

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra mechanické technologie

Studium mechanických vlastností svarových spojů oceli P92

Study of Mechanical Properties of P92 Welded Joints

Student:

Bc. Robert Jurásek

Vedoucí diplomové práce:

doc. Ing. Petr Mohyla, Ph.D.

Ostrava 2015

## Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Robert Jurásek**  
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství  
Studijní obor: 2303T002 Strojírenská technologie  
Specializace: 20 Strojírenská technologie  
Téma: **Studium mechanických vlastností svarových spojů oceli P92**  
**Study of Mechanical Properties of P92 Welded Joints**

### Zásady pro vypracování:

1. Zpracujte studii týkající se moderních žárovevých ocelí pro USC bloky tepelných elektráren
2. Zpracujte dosavadní dostupné výsledky, týkající se výzkumu vlivu tepelného zpracování na mechanické vlastnosti svarových spojů oceli P92
3. Navrhněte tepelné zpracování zkušebních svarových spojů
4. Proveďte zkušební svarové spoje na deskách o tloušťce 18 mm metodou 141+111
5. Vyhodnoťte výsledky destruktivních a nedestruktivních zkoušek svarových spojů
6. Na základě srovnání dosažených výsledků se staršími dostupnými výsledky navrhněte optimální tepelné zpracování svarových spojů
7. Vyslovte závěry

### Seznam doporučené odborné literatury:

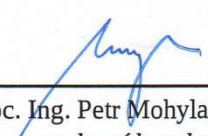
Kolektiv autorů: *Materiály a jejich svařitelnost*. Skripta pro výuku svářečských inženýrů a technologů, ZEROSS Ostrava, leden 2001  
KOUKAL, J., ZMYDLENÝ, T. *Svařování I*. skripta VŠB – TUO, Ostrava, 2005, ISBN 80-248-0870-6  
VODÁREK, V. *Fyzikální metalurgie modifikovaných (9-12)% Cr ocelí*. monografie VŠB – TUO, Ostrava, 2003, ISBN 80-248-0329-1  
Odborné články z konferencí METAL, CREEP, COST, LIEGE Conference, aj.


Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Petr Mohyla, Ph.D.**

Datum zadání: 12.12.2014  
Datum odevzdání: 18.05.2015



  
doc. Ing. Petr Mohyla, Ph.D.  
vedoucí katedry

  
doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.  
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě 18.5.2015



podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- беру на вѣдомі, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB – TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB–TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB–TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB–TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB–TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB–TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- беру на вѣдомі, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě 18.5.2015



podpis

Jméno a příjmení autora práce:

Bc. Robert Jurásek

Adresa trvalého pobytu autora práce:

Zborov 59, 78901



## ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

JURÁSEK, R. *Studium mechanických vlastností svarových spojů oceli P92 : diplomová práce*. Ostrava : VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra mechanické technologie, 2015, 93 s. Vedoucí práce: doc. Ing. Petr Mohyla, Ph.D.

Tato práce se zabývá problematikou volby vhodného režimu tepelného zpracování po zhotovení svarových spojů z oceli P92. Vhodné tepelného zpracování je voleno s ohledem na to, jak ve skutečnosti ovlivní mechanické vlastnosti těchto svarových spojů. Podstatou experimentální části bylo zhotovit svařováním zkušební spoje tloušťky 18 mm z oceli P92 a aplikovat na ně různá tepelná zpracování. Dále byly tyto zkušební spoje podrobeny nedestruktivním a destruktivním zkouškám v souladu s odpovídajícími normami. Hlavní pozornost byla upřena na výsledky z destruktivních zkoušek, jako byly příčná zkouška tahem, zkouška rázem v ohybu a kontrola tvrdosti. Výsledky z těchto zkoušek mechanických vlastností byly porovnány s výsledky předešlých experimentů zabývajících se totožnou problematikou a bylo vyhodnoceno nejvýhodnější tepelné zpracování.

## ANOTATION OF MASTER THESIS

JURÁSEK, R. *Study of Mechanical Properties of P92 Welded Joints : Master Thesis*. Ostrava : VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Mechanical Technology, 2015, 93 p. Thesis head: doc. Ing. Petr Mohyla, Ph.D.

This thesis is deals with issue of choice an appropriate heat treatment after making welded joints of P92 steel. Appropriate heat treatment is chosen by analyzing the influence of heat treatment on mechanical properties of these welded joints. The essence of the experimental part was to make testing joints of P92 steel by welding technology thickness 18 mm and apply them to different heat treatments. Additionally, these test joints weere subjected to non-destructive and destructive tests in accordance with relevant regulations. The main attention was paid to the results of destructive tests, such as the transverse tensile test, charpy impact test and control of hardness. Results from these tests of mechanical properties were compared with the results of previous experiments dealing with identical issue and was evaluated as the most appropriate post weld heat treatment.

**OBSAH**

|   |           |
|---|-----------|
| <b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZNAČEK .....</b>  | <b>4</b>  |
| <b>ÚVOD .....</b>   | <b>5</b>  |
| <b>1 VÝVOJ MATERIÁLŮ PRO USC BLOKY TEPELNÝCH ELEKTRÁREN .....</b>                                   | <b>6</b>  |
| 1.1 Moderní žárovevné oceli používané pro USC bloky .....   | 6         |
| 1.2 Mechanické vlastnosti vybraných materiálů pro USC bloky .....                                   | 9         |
| 1.3 Odolnost proti korozi za zvýšených teplot .....   | 10        |
| 1.4 Svařování žárovevných ocelí pro USC bloky .....   | 11        |
| <b>2 PŘEHLED MODIFIKOVANÝCH 9 – 12 % Cr ŽÁROPEVNÝCH OCELÍ SE<br/>    ZAMĚŘENÍM NA OCEL P92.....</b> | <b>13</b> |
| 2.1 Vliv chemických prvků na vlastnosti 9 – 12 % Cr modifikovaných ocelí .....                      | 14        |
| 2.2 Struktura 9 – 12 % Cr modifikovaných ocelí .....  | 19        |
| 2.3 Ocel P91 .....  | 23        |
| 2.4 Ocel P92 .....  | 24        |
| 2.4.1 Odolnost oceli P92 proti oxidaci v páře .....   | 25        |
| 2.5 Svařitelnost ocelí P91 a P92 .....  | 26        |
| <b>3 TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ OCELI P92 .....</b>   | <b>27</b> |
| 3.1 Vliv tepelného zpracování na mechanické vlastnosti oceli P92 .....                              | 28        |
| 3.2 Vliv tepelného zpracování svarových spojů oceli P92 na creepové vlastnosti .....                | 33        |
| <b>4 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST DIPLOMOVÉ PRÁCE .....</b>  | <b>35</b> |
| 4.1 Provedení zkušebních svarových spojů technologiemi 141 a 111 na deskách<br>tloušťky 18 mm ..... | 35        |
| 4.1.1 Informace o základním materiálu .....   | 35        |
| 4.1.2 Přídavný materiál .....   | 36        |
| 4.1.3 Úprava svarových ploch .....  | 37        |
| 4.1.4 Zhotovení zkušebních svarových spojů oceli P92 .....  | 38        |
| 4.2 Tepelné zpracování zkušebních svarových spojů oceli P92 .....                                   | 40        |
| 4.3 Nedestruktivní zkoušky svarových spojů oceli P92 .....  | 42        |
| 4.3.1 Kapilární zkouška (PT) .....  | 42        |
| 4.3.2 Zkouška prozářením (RT) .....   | 43        |
| 4.4 Destruktivní zkoušky svarových spojů oceli P92 .....  | 44        |
| 4.4.1 Příčná zkouška tahem .....  | 44        |
| 4.4.2 Zkouška rázem v ohybu .....   | 46        |
| 4.4.3 Zkouška tvrdosti .....  | 51        |

|           |   |           |
|-----------|---|-----------|
| 4.5       | Kontrola makrostruktury zkušebních svarových spojů .....        | 56        |
| 4.6       | Kontrola mikrostruktury zkušebních svarových spojů .....        | 58        |
| 4.6.1     | Mikrostruktura vzorku 730/3/3 .....                             | 60        |
| 4.6.2     | Mikrostruktura vzorku 730/6/1 .....                             | 62        |
| 4.6.3     | Mikrostruktura vzorku 760/4/4 .....                             | 64        |
| 4.6.4     | Mikrostruktura vzorku 760/5/6 .....                             | 66        |
| <b>5</b>  | <b>SROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ S VÝSLEDKY PŘEDEŠLÝCH EXPERIMENTŮ ....</b> | <b>70</b> |
| 5.1       | Srovnání výsledků z příčné zkoušky tahem .....                  | 70        |
| 5.2       | Srovnání výsledků ze zkoušky rázem v ohybu .....                | 72        |
| 5.3       | Srovnání výsledků zkoušky tvrdosti .....                        | 76        |
| <b>6</b>  | <b>DISKUSE DOSAŽENÝCH VÝSLEDKŮ .....</b>                        | <b>82</b> |
| <b>7</b>  | <b>ZÁVĚR .....</b>  | <b>84</b> |
| <b>8</b>  | <b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY .....</b>                          | <b>86</b> |
| <b>9</b>  | <b>SEZNAM POUŽITÝCH OBRÁZKŮ .....</b>                           | <b>89</b> |
| <b>10</b> | <b>SEZNAM POUŽITÝCH TABULEK .....</b>                           | <b>91</b> |
| <b>11</b> | <b>SEZNAM POUŽITÝCH GRAFŮ .....</b>                             | <b>92</b> |
| <b>12</b> | <b>SEZNAM PŘÍLOH .....</b>                                      | <b>93</b> |

## SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZNAČEK

| Značka                | Popis   | Jednotka  |
|-----------------------|---|-----------|
| ARA                   | <i>anizotermický rozpad austenitu</i>   | [ - ]     |
| ASTM                  | <i>Americká společnost pro testování a materiály</i>                                    | [ - ]     |
| $A_{c1}$              | <i>teplota počátku austenitické přeměny při ohřevu</i>                                  | [ ° C ]   |
| $A_{c3}$              | <i>teplota konce austenitické přeměny při ohřevu</i>                                    | [ ° C ]   |
| $A_5$                 | <i>tažnost</i>  | [ % ]     |
| ČSN                   | <i>Česká státní norma</i>   | [ - ]     |
| EN                    | <i>Evropská norma</i>   | [ - ]     |
| HB                    | <i>tvrdost dle Brinella</i>   | [ - ]     |
| HV10                  | <i>tvrdost dle Vickerse při zatížení 98,07 N</i>  | [ - ]     |
| HV30                  | <i>tvrdost dle Vickerse při zatížení 294,2 N</i>  | [ - ]     |
| hm.                   | <i>hmotnostní koncentrace</i>   | [ % ]     |
| ISO                   | <i>mezinárodní norma</i>  | [ - ]     |
| J                     | <i>faktor ukazatele metalurgické čistoty</i>  | [ % ]     |
| KV                    | <i>nárazová práce</i>   | [ J ]     |
| $KV_2$                | <i>nárazová práce pro zkušební tyč s V vrubem 2 mm</i>                                  | [ J ]     |
| $M_f$                 | <i>teplota konce martenzitické transformace</i>   | [ ° C ]   |
| $Mo_{ekv}$            | <i>ekvivalent obsahu molybdenu</i>  | [ hm. % ] |
| $M_s$                 | <i>teplota počátku martenzitické transformace</i>                                       | [ ° C ]   |
| $N_{ss/600^{\circ}C}$ | <i>obsah volného dusíku při teplotě 600 ° C</i>   | [ hm. % ] |
| $P_{LM}$              | <i>Larson – Millerův parametr</i>   | [ - ]     |
| $R_e$                 | <i>mez kluzu</i>  | [ MPa ]   |
| $R_m$                 | <i>mez pevnosti v tahu</i>  | [ MPa ]   |
| $R_{mT}$              | <i>mez pevnosti při tečení</i>  | [ MPa ]   |
| $R_{mT/10^5 h/600}$   | <i>mez pevnosti při tečení za dobu <math>10^5</math> h při teplotě zkoušení 600 ° C</i> | [ MPa ]   |
| $R_{p 0,2 min}$       | <i>smluvní mez kluzu</i>  | [ MPa ]   |
| SK                    | <i>svarový kov</i>  | [ - ]     |
| TIG                   | <i>technologie svařování v inertním plynu wolframovou elektrodou</i>                    | [ - ]     |
| TOO                   | <i>tepelně ovlivněná oblast svarového spoje</i>   | [ - ]     |
| TZ                    | <i>tepelné zpracování</i>   | [ - ]     |
| $T_{aust}$            | <i>teplota austenitizace</i>  | [ ° C ]   |
| $T_{pop}$             | <i>teplota popouštění</i>   | [ ° C ]   |
| t                     | <i>čas</i>  | [ s ]     |
| USC                   | <i>ultra super kritické parametry páry</i>  | [ - ]     |
| VHT                   | <i>vrub umístěný v teplem ovlivněné oblasti svarového spoje</i>                         | [ - ]     |
| VWT                   | <i>vrub umístěný ve svarovém kovu svarového spoje</i>                                   | [ - ]     |
| X                     | <i>faktor ukazatele metalurgické čistoty</i>  | [ ppm ]   |
| Z                     | <i>kontrakce</i>  | [ % ]     |
| ZM                    | <i>základní materiál</i>  | [ - ]     |

## ÚVOD

Momentální situace v tepelném odvětví energetiky podléhá požadavku na snížení emisí a zvýšení účinnosti svých energetických zařízení v celosvětovém měřítku. Zvýšení účinnosti tepelných elektráren je podmíněno aplikací vyšších nadkritických parametrů páry. V současnosti jsou neustále vyvíjeny a hledány vhodné konstrukční materiály, které by zajistily vysokou účinnost tepelných elektráren. Pro svou důležitost jsou jedněmi z nejvíce testovaných ocelí například ty, které slouží pro konstrukci parovodního potrubí mezi kotlem a turbínou, kde mohou pracovat s takzvanými ultra super kritickými parametry páry. Při těchto podmínkách se pohybujeme v tlacích okolo 30 MPa a teplotě kolem 600° C. Za uvedených podmínek musí být použité konstrukční materiály extrémně odolné vůči tečení za vysokých teplot a zároveň musí být charakteristické vysokou korozní odolností vůči pracovnímu médium páry s vysokou teplotou. Do skupiny materiálů, které mohou pracovat za uvedených podmínek se řadí modifikované 9 – 12 % Cr oceli. Mezi materiály z této skupiny, které se v současnosti hojně využívají pro konstrukci parovodních soustav energetických zařízení se řadí ocel P92.

Ocel P92 vychází z původní 9 % Cr oceli P91. Jako hlavní modernizace je považována změna chemického složení a to dolegováním nízkým obsahem wolframu. Jelikož jsou konstrukce parovodního potrubí spojovány nejvíce technologií svařování, je nutný požadavek provedení vyhovujících svarových spojů, které musí mít dostatečně vysoké mechanické vlastnosti zajištěné po celou dobu požadované životnosti. Z hlediska důležitosti svarových spojů u těchto konstrukcí byl proveden tento experiment v rámci diplomové práce, který se zabýval vlivem různých režimů tepelného zpracování na výsledné mechanické vlastnosti svarových spojů z oceli P92.

Pro tento experiment byly použity zkušební desky o rozměrech 250 x 250 x 18 mm z oceli P92 . Zkušební desky byly svařeny pomocí technologie 141 a 111 a následně podrobeny různým režimům tepelného zpracování. Dále bylo nutno provést destruktivní zkoušky, které obsahovaly příčnou zkoušku v tahu, rázem v ohybu a zkoušku tvrdosti. Dosažené výsledky z těchto zkoušek byly vyhodnoceny a následně srovnány s experimenty, které se zabývaly totožnou problematikou. Srovnání dosažených výsledků s předešlými experimenty bylo provedeno z důvodu lepšího posouzení vlivu tepelného zpracování na mechanické vlastnosti svarových spojů oceli P92. Na závěr této diplomové práce je uvedeno vyhodnocení celého experimentu s diskuzí dosažených výsledků a stanovení nejvýhodnější varianty režimu tepelného zpracování.

# 1 VÝVOJ MATERIÁLŮ PRO USC BLOKY TEPELNÝCH ELEKTRÁREN

Již po několik desítek let probíhá po celém světě intenzivní vývoj, který se zabývá oblastí energetických zařízení. Vývoj v této oblasti si klade za cíl zvýšit účinnost tepelných elektráren, což lze dosáhnout použitím super kritických nebo až ultra super kritických parametrů páry. V případě superkritických parametrů se jedná o použití páry při tlaku 260 barů a teplotě okolo 600° C. Za ultra super kritické podmínky jsou pak považovány tlaky páry nad 300 barů a teplota nad 600° C. Je uváděno, že právě při výstupních parametrech páry 600° C/300 barů v ultra super kritických blocích, je dosaženo zvýšení tepelné účinnosti o 6 až 8 % a zároveň snížení emisí oxidu uhličitého dokonce až o 20 %. Pokud bylo uskutečněno toto zvýšení parametrů páry nad kritické hodnoty, musí být na druhou stranu použity materiály, které obstojí těmto očekávaným kritickým podmínkám. Z tohoto důvodu byl zaznamenán i pokrok v oblasti žárovevných ocelí, u kterých je požadována vyšší mez pevnosti při tečení, výborná odolnost proti oxidaci a také odolnost proti korozi za zvýšených teplot. [1]

## 1.1 Moderní žárovevné oceli používané pro USC bloky

Mezi používané moderní žárovevné oceli pro ultra super kritické parametry jsou řazeny modifikované nízkolegované bainitické oceli, modifikované martenzitické žárovevné oceli, austenitické a niklové slitiny. Legováním bainitických a martenzitických ocelí prvky jako je titan, niob, dusík nebo bór je u těchto ocelí dosaženo vysokých hodnot meze pevnosti při tečení. Trend některých zemí v posledních letech je přidávání některých prvků do oceli, za účelem zvýšení určitých vlastností. Mezi takové prvky se řadí wolfram, který je do těchto ocelí přidáván právě za účelem zvýšení meze pevnosti při tečení. Přehled materiálů, které se ve velké míře používají pro konstrukci super kritických a ultra super kritických bloků je uveden v **tab. 1**. Doporučené materiály pro výrobu jednotlivých dílů pro nadkritické podmínky s teplotním omezením jsou uvedeny v **tab. 2**. [1]

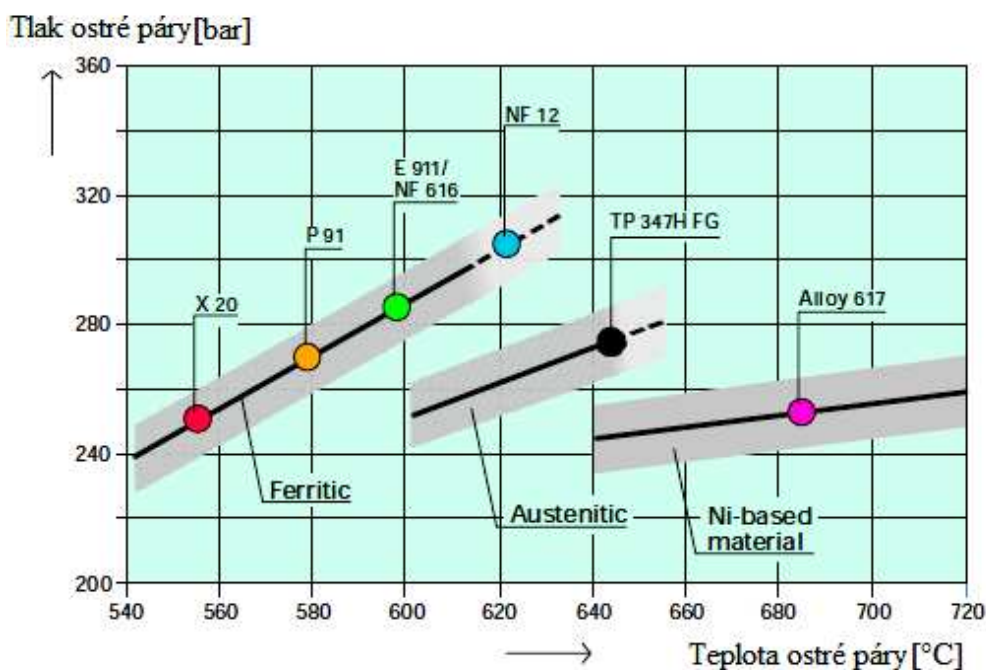
**Tab. 1** – Přehled materiálů používaných pro konstrukci nadkritických bloků [1]

| Typ materiálu       | Označení oceli          |                |
|---------------------|-------------------------|----------------|
| Uhlíkové oceli      | P 235 G H               |                |
|                     | P 265 G H               |                |
| Bainitické oceli    | 16 Mo 3                 | (15020)        |
|                     | 13 CrMo 4 - 5           | (15121)        |
|                     | 14 MoV6 - 3             | (15128)        |
|                     | 10 CrMo 9 - 10          | (15313, T/P22) |
|                     | 15 NiCuMoNb 5           | (WB36)         |
|                     | 7 CrWVMoNb 9 - 6        | (T/P 23)       |
|                     | 7 CrMoVTiB 10 - 10      | (T/P 24)       |
| Martenzitické oceli | X 20 CrMoV 12 - 1       | (17134)        |
|                     | X 10 CrMoVNB 9 - 1      | (T/P 91)       |
|                     | X 11 CrMoWNB 9 - 1 - 1  | (E 911)        |
|                     | X 10 CrWVMoVNB 9 - 2    | (T/P 92)       |
|                     | X 12 CrCoWNB 12 - 2 - 2 | (VM12 - SHC)   |
| Austenitické oceli  | TP 347H FGF             |                |
|                     | SUPER 304 H             |                |
|                     | HR 3C                   |                |
|                     | DMV 310 N               |                |
|                     | SANICRO 25              |                |
| Niklové slitiny     | Alloy 617               |                |
|                     | Alloy 740               |                |

**Tab. 2** – Aplikace materiálů používaných pro nadkritické bloky [1]

| Dílo kotle                         | Materiál               | Teplotní limit použitelnosti [°C] |
|------------------------------------|------------------------|-----------------------------------|
| Membránové stěny                   | 13CrMo 4 - 5           | 540                               |
|                                    | 7 CrWVMoNb 9 - 6       | 550                               |
|                                    | 7 CrMoVTiB 10 - 10     | 550                               |
|                                    | X10CrWVMoVNB 9 - 2     | 590                               |
|                                    | X12 CrCoWNB 12 - 2 - 2 | 600                               |
|                                    | Alloy 617 mod.         | 650                               |
| Komory, parovody, potrubí, systémy | X10CrMoVNB 9 - 1       | 580                               |
|                                    | X11CrMoWVNB 9 - 1 - 1  | 600                               |
|                                    | X10CrWVMoVNB 9 - 2     | 625                               |
|                                    | Alloy 617              | 735                               |
|                                    | Alloy 263              | 735                               |
| Ohříváky, přehříváky               | X12CrCoWNB 12 - 2 - 2  | 610                               |
|                                    | TP 347 H FGF           | 615                               |
|                                    | Super 304H             | 660                               |
|                                    | HR 3 C                 | 670                               |
|                                    | Sanicro 25             | 700                               |
|                                    | Alloy 617              | 770                               |
|                                    | Alloy 740              | 770                               |

Z výše uvedených tabulek je zřejmé, že bainitické nízkolegované oceli se uvažují jako materiál pro výrobu membránových plášťů nadkritických kotlů s teplotním omezením do 550° C. Pro komponenty s pracovní teplotou do 600° C se používají moderní modifikované chromové martenzitické oceli. Pro vyšší pracovní teploty je využíváno niklových slitin, jako jsou Alloy 617 nebo Alloy 740, které jsou určeny do pracovních teplot až 650° C. Pro výrobu komor, parovodů a potrubí do teploty 625° C je vhodné použití martenzitických ocelí, naopak pro teploty nad 625° C je doporučeno použít už niklové slitiny. Na výrobu ohřívačů a přehřívačů se nabízí použití martenzitické oceli VM 12 – SHC, kterou je možno použít do pracovních teplot až 610° C. Pro výrobu těchto komponentů s pracovní teplotou do 700° C je již nutné použití niklových slitin. [1]

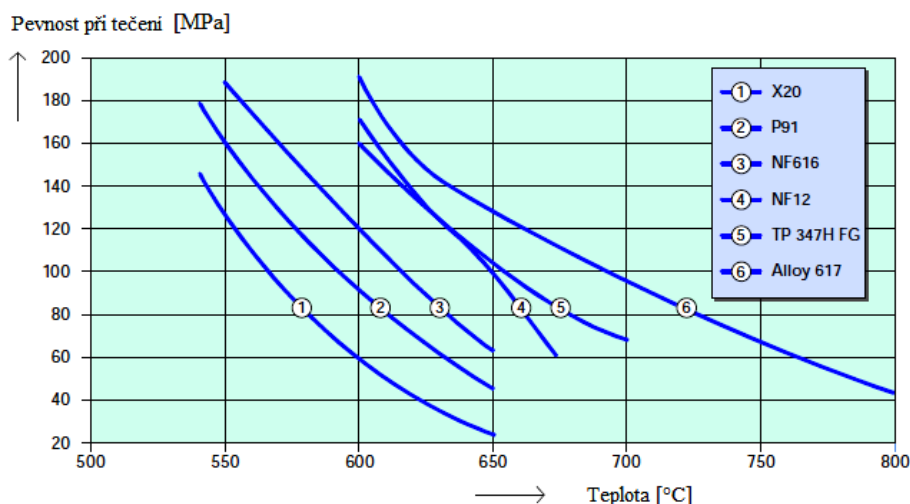


**Obr. 1** – Použití vybraných materiálů pro USC bloky v závislosti na tlaku a teplotě [2]

Vývoj a výzkum v posledních desetiletí týkající se moderních žárovečných ocelí byl zaměřen hlavně na modifikované chromové oceli, které jsou charakteristické 9 – 12 % chromu. První z představitelů novodobých modifikovaných chromových ocelí je ocel P91 (X10CrMoVNbN 9-1), která dosahuje oproti předešlým ocelím stejného typu dvojnásobně vyšší meze pevnosti při tečení. Tato zlepšená vlastnost je důsledkem intenzivního precipitačního zpevnění velmi jemnými částicemi nitridu vanadu, který je charakteristický nízkou rychlostí hrubnutí a velmi vysokou dlouhodobou rozměrovou stabilitou při creepovém zatížení. Tato ocel s označením P91 byla mezi prvními z této kategorie



zařazena do materiálových norem v České republice i v Evropské unii. Hlavní cíl vývoje těchto moderních ocelí je kladen na dosažení meze pevnosti při tečení při 600° C za 100 000 hodin na úroveň 100 MPa, což u oceli P91 nebylo dosaženo. Její hodnota meze tečení při 600° C za 100 000 hodin je 93 MPa. V následujících letech byly vyvíjeny další modifikované chromové oceli, jako je japonská ocel P92 (NF616). Evropa odpověděla výrobou oceli E911, která je velmi podobná oceli P92 a je považována za její evropskou verzi. U obou těchto ocelí bylo překročeno hranice 100 MPa v mezi pevnosti při tečení. [1]



**Obr. 2** – Pevnost při tečení vybraných materiálů pro USC bloky [2]

**Tab. 3** – Chemické složení používaných materiálů pro konstrukci nadkritických bloků [1]

| Ocel     | C     | Mn    | Si        | Cr    | Ni    | Mo    | W     | V     | Nb    | N     | B                               |
|----------|-------|-------|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|---------------------------------|
| 17134    | 0.17  | 0.50  | 0.25      | 10.6  | 0.30  | 0.80  | 0.30  | 0.20  | -     | -     | -                               |
|          | -0.23 | -1.00 | -0.60     | -12.5 | -0.80 | -1.20 | -0.60 | -0.35 | -     | -     | -                               |
| P91      | 0.08  | 0.30  | 0.20      | 8.00  | max.  | 0.85  | -     | 0.18  | 0.06  | 0.03  | -                               |
|          | -0.12 | -0.60 | -0.50     | -9.50 | 0.50  | -1.05 | -     | -0.25 | -0.10 | 0.07  | -                               |
| E911     | 0.10  | 0.30  | 0.10      | 8.50  | 0.20  | 0.90  | 0.90  | 0.15  | 0.04  | 0.05  | 0.0005                          |
|          | -0.13 | -0.60 | 0.30      | -9.50 | -0.40 | -1.10 | -1.10 | -0.25 | -0.10 | 0.08  | -0.005                          |
| VM12-SHC | 0.10  | 0.15  | max. 0.50 | 11.0  | 0.10  | 0.20  | 1.30  | 0.20  | 0.03  | 0.03  | 0.003 - 0.006<br>Co = 1.4 - 1.8 |
|          | -0.14 | -0.45 |           | -12.0 | -0.40 | -0.40 | -1.70 | -0.30 | -0.06 | -0.07 |                                 |
| P92      | 0.07  | 0.30  | max.      | 8.50  | max.  | 0.30  | 1.50  | 0.15  | 0.04  | 0.03  | 0.001                           |
|          | -0.13 | -0.60 | 0.50      | -9.50 | 0.40  | -0.60 | -2.00 | -0.25 | -0.09 | 0.07  | -0.006                          |

## 1.2 Mechanické vlastnosti vybraných materiálů pro USC bloky

Postupné zlepšování mechanických vlastností těchto ocelí umožnilo značně snížit tloušťky stěn trubek pro jejich aplikace. Tato redukce přinesla mnoho výhod, mezi hlavní výhodou patří snížení hmotnosti energetických zařízení. Snížená hmotnost má pak vliv na snadnější provádění montáží a oprav. Samozřejmě velká výhoda je také z ekonomického hlediska. [3]

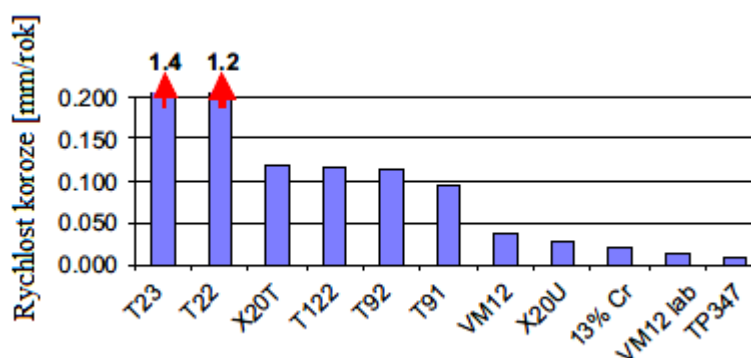
**Tab. 4** – Mechanické vlastnosti materiálů pro konstrukci nadkritických bloků [3]

| Ocel        | $R_{p0,2}$<br>[MPa] | $R_m$<br>[MPa] | $A_5$<br>[%] | $A_v$ (ISO-V)<br>[J] |
|-------------|---------------------|----------------|--------------|----------------------|
| X20 (17134) | $\geq 500$          | 700-850        | $\geq 16$    | $\geq 39$            |
| T/P91       | $\geq 450$          | 620-850        | $\geq 17$    | $\geq 41$            |
| E911        | $\geq 450$          | 620-850        | $\geq 17$    | $\geq 41$            |
| T/P92       | $\geq 440$          | 620-850        | $\geq 17$    | $\geq 27$            |
| VM12-SHC    | $\geq 450$          | 620-850        | $\geq 17$    | $\geq 27$            |

### 1.3 Odolnost proti korozi za zvýšených teplot

Koroze za zvýšených teplot může být příčinou různých problémů v energetických soustavách. Jeden z problémů je například zvýšení teploty materiálu během provozu v důsledku vytvoření ochranné oxidační vrstvy na povrchu trubky. Tím dojde k zeštíhlení průměru pro proudění páry a zvýšení napětí. Uvolňování vytvořené oxidační vrstvy pak může způsobovat erozivní porušení v dalších komponentech soustavy. Pokud je bráno v úvahu množství chromu, který je obsažen v ocelích pro USC bloky v různých poměrech, mohou se tyto oceli porovnávat z hlediska korozní odolnosti za zvýšených teplot. Kromě chromu hrají také významnou roli i další přídavné prvky, jako je křemík a mangan. S ohledem na chování těchto ocelí, je jejich použití omezeno především odolností vůči oxidaci páry, nikoliv hodnotami při tečení. Z **obr. 3** je zřejmé, že s vyšším obsahem chromu klesá rychlost koroze. Například feritickou ocel VM 12, která obsahuje 12 % Cr, je proto možné použít až do teplot 650° C. [4]

Korozní odolnost za zvýšených pracovních teplot 600° C a výše není u 9 % Cr ocelí zcela vyhovující. Je potřeba zvýšit obsah chromu nad hranici 11,5 %, kdy by došlo ke zlepšení odolnosti vůči korozi za zvýšených teplot. Abychom zlepšili odolnost vůči korozi za vysokých teplot, je nutné dosáhnout plně martenzitické struktury. [5]

**Obr. 3** – Porovnání rychlosti koroze jednotlivých materiálů pro USC bloky při 650°C [4]

## 1.4 Svařování žárovevných ocelí pro USC bloky

Velice důležitým aspektem je dodržování jistých zásad a kontrolování podmínek při svařování těchto materiálů. Dodržení těchto podmínek a doporučení může vést k minimalizaci vzniku možných rizik a problémů jak při samotném svařování, tak i po svařování a následném provozu. Hlavně je nutné se zaměřit na: [1]

### Dodržení

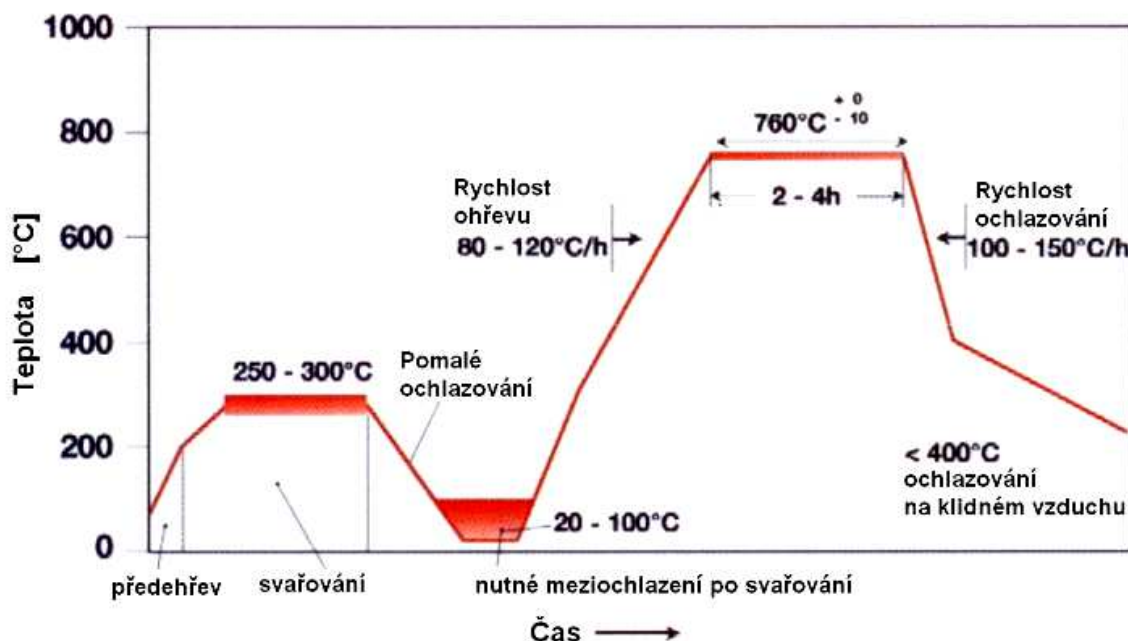
- Předepsané teploty předehřevu
- Předepsané teploty interpass
- Měrného tepelného příkonu do svaru
- Předepsané výšky kladených housenek

### Svařování

- Doporučenými metodami svařování
- Předepsanými materiály s nízkým obsahem difuzního vodíku
- Svařování s předepsaným počtem vrstev
- Kladení housenek předepsaným způsobem
- Vhodné tepelné zpracování po svařování

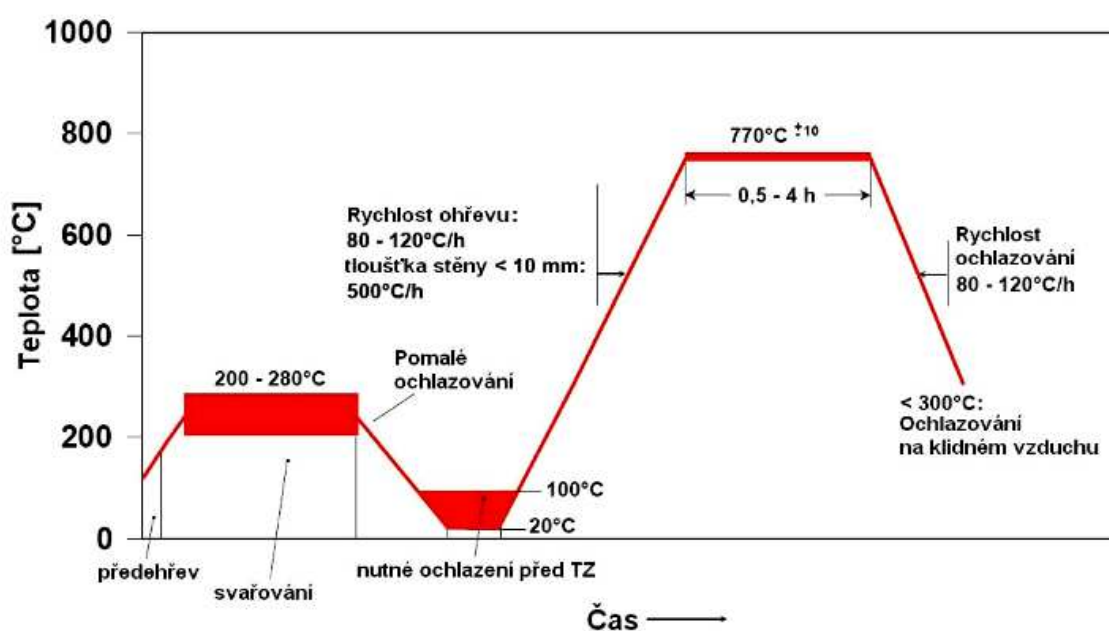
Snížený obsah uhlíku u ocelí P91 a P92 umožňuje snížení teploty předehřevu pod teplotu  $M_s$ . Proto při svařování zůstává v mikrostruktuře menší množství austenitu, jehož přítomnost je výhodná z hlediska jeho plastických vlastností a rozpouštění difuzního vodíku. Je nutné, aby vzniklý martenzit ve struktuře byl popuštěn již v samotném průběhu svařování. To je realizováno kladením následující housenky na stávající housenku, to znamená, že poslední krycí housenka nebude už popuštěna. Mimořádně důležitým požadavkem je pro tuto skutečnost kladení housenek o maximální výšce 2,5 mm. Svarové spoje z těchto ocelí je třeba pozvolna ochladit z maximální teploty interpass pod teplotu  $M_f$  a následně popustit. Není doporučeno svarové spoje ihned po svařování ochladit na okolní teplotu, ale těsně pod teplotu  $M_f$  z důvodu toho, aby austenit vzniklý při svařování transformoval na martenzit ještě před tepelným zpracováním svarového spoje. V případě, že by transformace proběhla až při tepelném zpracování, vzniklý martenzit by nebyl dostatečně popuštěn a tím by došlo k zásadnímu snížení plastických vlastností svarového spoje. Z důvodu náchylnosti těchto ocelí na vznik nízkoteplotních žíhacích trhlin je velmi

důležité volit pomalé rychlosti ohřevu a ochlazování. Výdrž na popouštěcí teplotě je závislá na tloušťce svařovaného materiálu a také na použitém přídavném materiálu. [1]



Obr. 4 – Teplotní režim při svařování ocelí P91 a P92 [6]

Teplotní režim při svařování oceli VM 12 – SHC je zobrazen na **obr. 5**. Od předchozího teplotního režimu pro oceli P91 a P92 se liší pouze ve snížené maximální teplotě interpass, která je stanovena na maximální hodnotu 280° C a ve zvýšení popouštěcí teploty na 770° C. Předností této oceli je docílení zvýšené korozní odolnosti v oblasti pracovních teplot v porovnání s ocelí P92. [1]



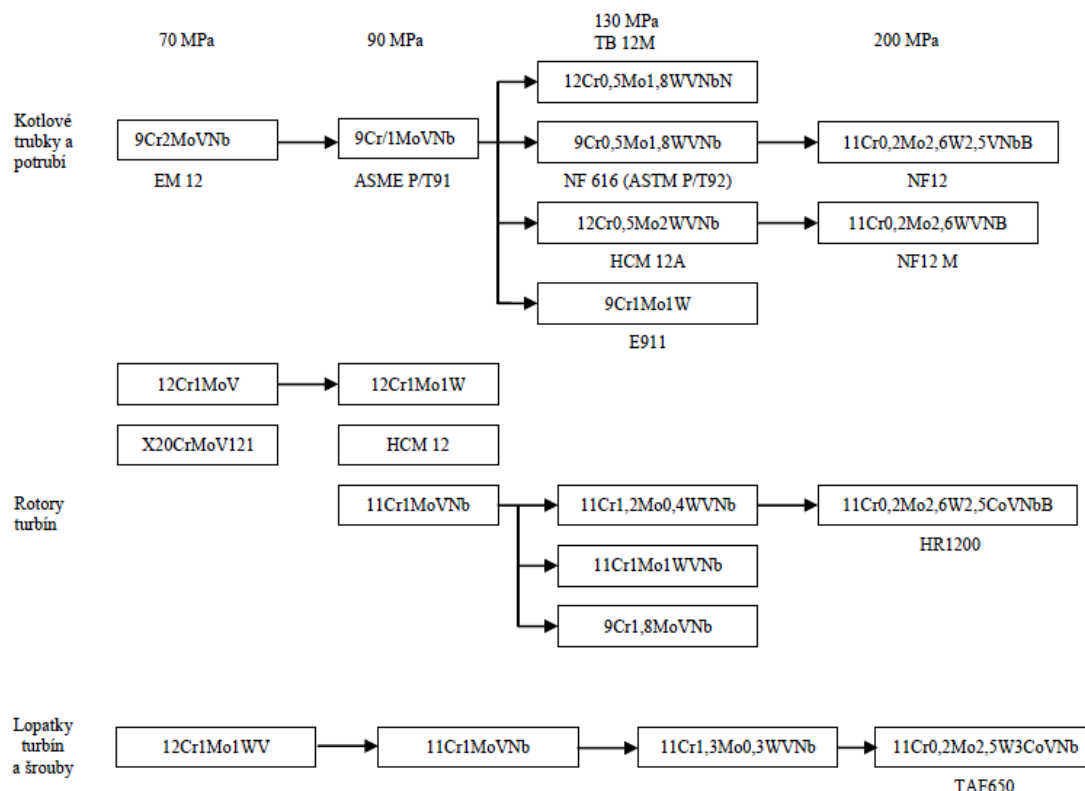
Obr. 5 – Teplotní režim při svařování oceli VM 12 - SHC [6]

## 2. PŘEHLED MODIFIKOVANÝCH 9 – 12 % Cr ŽÁROPEVNÝCH OCELÍ SE ZAMĚŘENÍM NA OCEL P92

Žáropevné oceli tohoto typu jsou používány zejména pro konstruování energetických zařízení pro rozvod páry o různých parametrech, dále pro zásobníky, parní a plynové turbíny, turbokompresory a prvky upevňující tepelné stroje. V dnešní době jsou žáropevné slitiny hojně používány jak v konstrukci standardních zařízení, tak i pro zařízení jaderné techniky. Hlavním a zásadním požadavkem, který musí splňovat žáropevné oceli, je zachování daných mechanických vlastností za zvýšené teploty. Nejdůležitější roli při změnách těchto vlastností hraje zásadně teplota, nicméně ta není jediným faktorem při degradaci materiálů. Hlavními požadavky pro žáropevné materiály jsou: [7]

- Vysoká mez pevnosti při dlouhodobém tečení
- Vysoká mez pevnosti a kluzu
- Dobrá tvárnost, tažnost a odolnost proti křehkému lomu
- Vysoká odolnost vůči tepelné a tepelně-mechanické únavě
- Stabilita struktury, nízká náchylnost k poklesu i nárůstu zpevnění a zvýšení provozní křehkosti
- Vhodné fyzikální vlastnosti, vysoký součinitel tepelné vodivosti a nízký součinitel tepelné roztažnosti
- Dobrá žáruvzdornost a korozní odolnost v prostředí spalín a páry i za zvýšených teplot
- Dobré technologické vlastnosti, tvařitelnost a zejména svařitelnost

Jak již bylo uvedeno, vývoj žáropevných ocelí je úzce spjat s vývojem tepelné energetiky. Už po několik let je vyvíjena snaha o zvyšování účinnosti tepelných elektráren a snižování emisí, důsledkem toho bylo nutno zvýšit i hlavní parametry páry. Zvýšení parametrů páry s sebou samozřejmě nese i zvýšení nároků pro používané materiály v této vysokoteplotní a tlakové oblasti konstrukčních součástí kotlů. Tyto materiály byly modifikovány úpravou chemického složení, která spočívala ve snížení obsahu uhlíku a přidáním některých legur jako W, Nb, N a B. Mezi hlavní země, které se zasloužily o počátek vývoje těchto ocelí, patřily bezesporu Japonsko a USA. Na **obr. 6** je zobrazen vývoj modifikovaných 9 – 12 % Cr ocelí. [7]



**Obr. 6 – Schéma vývoje modifikovaných 9-12 % Cr ocelí [3]**

## 2.1 Vliv chemických prvků na vlastnosti 9 – 12 % Cr modifikovaných ocelí

V samotném průběhu vývoje 9 – 12 % Cr modifikovaných ocelí byl stanoven optimální obsah jednotlivých prvků za účelem zvýšení zejména meze pevnosti při tečení s dostatečnou úrovní lomové tažnosti. Příznivý vliv jednotlivých prvků na tyto vlastnosti závisí také na jejich množství, které je v oceli obsaženo. [8]

### Uhlík

U tohoto typu ocelí uhlík podporuje vznik martenzitické struktury a zvyšuje pevnost. S vyšším obsahem uhlíku pak roste i tvrdost martenzitu a dochází ke zhoršení některých technologických vlastností, jako je tvařitelnost a hlavně svařitelnost. Vyšší obsahy uhlíku dále ukázaly, že mají negativní vliv na mez pevnosti při tečení. V současné době se pohybují obsahy uhlíku těchto ocelí do 0,1 hm. % oproti předešlým ocelím, které obsahovaly až 0,25 hm. % C, tím došlo k podstatnému zlepšení svařitelnosti. Snížením množství uhlíku až na 0,05 hm. % se pak dosáhne podstatně lepší svařitelnosti, avšak mez pevnosti při tečení je velmi snížena. Z důvodu vyrovnaní snížení obsahu uhlíku se záměrně dolegovávají oceli dusíkem, který patří mezi intersticiální prvky, čímž dojde ke zlepšení creepových vlastností v důsledku vytvoření karbonitridů niobu a nitridů vanadu. [3]

## Dusík

Jeho vliv v oceli je podobný jako v případě uhlíku, tudíž zvyšuje pevnost a žárovevnost oceli zapříčiněnou tvorbou nitridů vanadu nebo karbonitridů niobu. Z tohoto důvodu je současný trend ve zvyšování dusíku v nových materiálech až na obsah 0,09 hm. %. S ohledem na žárovevnost těchto modifikovaných ocelí je důležitý obsah volného dusíku  $N_{ss}$ , který není vázán na prvky jako je Al, Ti a niob. Tento volný dusík je pak přednostně vázán na vanad a dochází k vytvoření jemných nitridů vanadu. Obsazení volného dusíku je závislé na jeho celkovém obsahu a na obsahu prvků, které mají velkou afinitu k dusíku. Hlavní nebezpečí spočívá v obsahu hliníku, který tvoří nejstabilnější nitridy. Běžně se tyto nitridy nerozpouštějí při teplotách austenitizace. Dusík také může tvořit nitridy vanadu v průběhu creepové expozice. Obsah v tuhém roztoku je popsán dle rovnice: [3]

$$N_{ss/600^{\circ}C} = N_{ss/1050^{\circ}C} - N_{AlN/600^{\circ}C} \quad (1)[3]$$

$N_{ss/1050^{\circ}C}$  - obsah N [hm. %] v tuhém roztoku po rozpouštěcím žíhání za teploty 1050 °C

$N_{AlN/600^{\circ}C}$  - obsah N, který je vázán na AlN za teploty 600 °C

## Bór

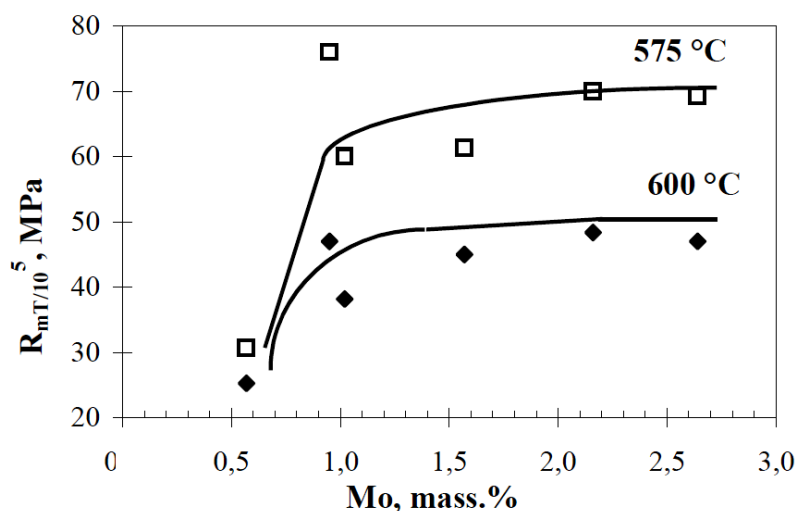
Bylo prokázáno, že nízké obsahy bóru v modifikovaných 9 % Cr ocelí mají podstatný vliv na žárovevné vlastnosti a odolnost vůči zkřehnutí. Jedna z pozitivních charakteristik bóru je ta, že umožňuje stabilizovat dislokace. Stabilizuje hranice zrn a subzrn a tím přispívá k celkovému zpevnění. Přítomnost bóru má také vliv na zvýšení nukleační rychlosti karbidů  $M_{23}C_6$ . [3, 8]

## Chrom

Tento prvek se řadí mezi feritotvorné i karbidotvorné prvky a současně je nejdůležitějším přísadovým prvkem těchto modifikovaných ocelí. Přítomnost chromu v oceli výrazně zvyšuje prokalitelnost. Při popouštění tvoří chrom karbidy, mezi jejichž nejstabilnější a nejdůležitější představitele patří z hlediska dosažení optimálních mechanických vlastností karbid  $M_{23}C_6$ . Chrom společně s přísadou dalších legur má vliv na zvýšení odolnosti vůči popouštění. Vyšší obsahy chromu mimo tvorbu karbidů také snižují teplotu  $M_s$  na teploty okolo 400° C. U ocelí s obsahem chromu do 9 % se dolegovává feritotvornými prvky, jako je molybden a křemík z důvodu získání zcela martenzitické struktury po normalizaci. Oceli s obsahem chromu nad 12 % jsou negativně ovlivněny zkřehnutím při 475° C, přičemž se mez pevnosti téměř nemění. [3, 7]

## Molybden

Přísada molybdenu se do ocelí přidává za účelem zpevnění tuhého roztoku i při vyšších teplotách. Podobně jako chrom je také molybden feritotvorný a karbidotvorný prvek. Výsledky předchozích experimentů ukázaly, že zvýšený obsahu molybdenu výrazně nepřispívá ke zvýšení pevnosti při tečení. Pro zkoušky trvající  $10^5$  hodin bylo charakteristické, že díky přidání molybdenu do 1 % bylo dosaženo lepší pevnosti při tečení. Obsahy molybdenu nad 1,6 % způsobují po popouštění a normalizačním žhání výskyt karbidů  $M_{23}C_6$  a  $M_6C$ . Karbidy  $M_6C$  způsobují snížení pevnosti při tečení pomocí rozpuštěných MX částic a mají negativní vliv na snížení obsahu molybdenu a wolframu v tuhém roztoku. Na **obr. 7** je zobrazen vliv obsahu molybdenu na pevnost při tečení.[3, 9]



**Obr. 7** – Vliv obsahu molybdenu na pevnost při tečení [10]

## Wolfram

Tento prvek se do těchto typů ocelí přidává za účelem zpevnění tuhého roztoku za vyšších teplot, podobně jako molybden. První země, která se snažila zvýšit creepovou pevnost právě přidáním wolframu, bylo Japonsko. Postupnými experimenty bylo dokázáno, že wolfram zvyšuje pevnost při tečení do  $10^5$  hodin. Podle současných vědeckých prací zvýšené obsahy wolframu zrychlují tvorbu Lavesovy fáze a karbidů  $M_6C$ , tím dochází k odpevnění matrice. Wolfram stabilizuje  $\delta$ -ferit a s obsahem až 4 % wolframu se může vyskytovat ve struktuře až 10 %  $\delta$ -feritu. Abychom stanovili maximální hodnoty wolframu a molybdenu v 9 % Cr ocelí, vznikl matematický vztah, který je založený na rozdílech v molární hmotnosti zmíněných prvků. [3, 11]

$$Mo_{ekv} = hm. \%Mo + 0,5(hm. \%W) \quad (2)[3]$$



**Vanad**

Ve velké míře způsobuje ovlivnění 9 % Cr ocelí precipitačním zpevněním. Pohyb dislokací je zabraňován pomocí precipitátů vanadu. Precipitáty, které obsahují niob a uhlík jsou často označovány jako MX. Jestliže je zaznamenán vyšší obsah dusíku v oceli, vylučují se jemné nitridy vanadu VN, které se vylučují při teplotách popouštění 750 – 760° C, pokud je však obsah dusíku vysoký, mohou být vyloučeny i při teplotní expozici za teplot 550 až 650° C. Souhrnně lze uvést, že precipitáty vanadu zvyšují žárovevné vlastnosti a přispívají k precipitačnímu zpevnění. [3]

**Mangan**

Je přidáván do 9 % Cr ocelí jako desoxidační prvek a jako levnější náhrada niklu, protože je austenitotvorný. Nemá však tak vlivný účinek na pevnost a tvrdost jako deficitní nikl. V ocelích typu P91 je mangan obsažen 0,5 až 0,6 hm. % a v ocelích typu P92 je obsažení manganu podobné. [3]

**Nikl**

Způsobuje v ocelích zpevnění tuhého roztoku a přispívá ke zlepšení pevnostních charakteristik, na druhou stranu však způsobuje zhoršení žárovevnosti. Nikl je silně austenitotvorný a značně snižuje transformační teploty  $A_{c1}$  a  $M_s$ . Snížení transformační teploty  $M_s$  má vliv na omezení tvorby samopopuštěného martenzitu. Dále nikl zvyšuje prokalitelnost a zvyšuje tvrdost martenzitu. Zhoršení žárovevnosti je důsledkem toho, že má nikl záporný vliv na stabilitu karbidické fáze. Nikl také rovněž přispívá k tvorbě karbidu  $M_6C$  a způsobuje hrubnutí karbidů  $M_{23}C_6$  a  $M_6C$ . Vzniklý karbid  $M_6C$  má za následek rozpouštění fáze MX, zapříčiňuje se o snížení obsahu molybdenu v tuhém roztoku. [3]

**Kobalt**

Přidávání kobaltu do 9 % Cr ocelí je trendem posledních let z důvodu potlačení obsahu uhlíku v oceli, čímž kobalt přispívá ke zlepšení svařitelnosti. Kobalt je austenitotvorný a jeho přítomnost snižuje možnost tvorby  $\delta$ -feritu, nezvyšuje však prokalitelnost. Po normalizaci a popouštění kobalt vykazuje dobrou rozpustnost v matici a velmi málo snižuje transformační teploty  $A_{c1}$  a  $M_s$ . Kobalt přispívá ke zvýšení tvrdosti martenzitu vlivem zpevňování tuhého roztoku, které se projevuje při popouštění až do teplot 500° C. Po dokončení popouštění kobalt nevytváří sekundární fáze a z toho důvodu neprobíhá v materiálu sekundární vytvrzování. Při krátkodobých zkouškách tečení ocelí, které obsahovaly 1,5 hm. % kobaltu, bylo prokázáno zvýšení meze pevnosti při tečení o 30 MPa oproti ocelím, které neobsahovaly žádné množství kobaltu, [3, 12, 13]

**Niob**

Menší množství niobu je do 9 % Cr ocelí přidáváno za účelem minimalizování růstu zrna austenitu při dlouhodobé výdrži na vysoké teplotě ohřevu u tepelného zpracování. Niob tvoří částice NbX s uhlíkem nebo dusíkem, které se rozpouštějí při teplotách vyšších než je teplota austenitizace, při nižší teplotě se rozpouštějí pouze částečně. Jestliže dojde k úplnému rozpuštění částic NbX, nastává výrazný nárůst původního austenitického zrna s následným snížením vrubové houževnatosti. Nerozpuštěné částice NbX mají na strukturu oceli kladný vliv, který spočívá v brzdění růstu původního austenitického zrna. U oceli P91 byly částice NbX detekovány ve struktuře už po normalizaci i po kalení do vody. Tyto částice NbX mají globulární tvar a jsou charakteristické velikostí 0,1 - 0,4  $\mu$ m. [3, 14, 15]

**Křemík**

Způsobuje zpevnění tuhého roztoku a zvyšuje v ocelích odolnost proti oxidaci. Křemík přispívá ke vzniku  $\delta$ -feritu, který má při větším výskytu za následek snížení vrubové houževnatosti. S rostoucím obsahem křemíku také roste možnost vzniku Lavesovy fáze, která při precipitaci taktéž snižuje vrubovou houževnatost a žárovevnost. [3, 8, 16]

**Hliník**

Přidává se do ocelí jako desoxidační prvek a jeho přítomnost má negativní vliv na žárovevnost. Snížení žárovevnosti je zapříčiněno teplotou precipitace nitridů a karbonitridů, které při chladnutí z teploty likvidu precipitují zejména po hranicích austenitických zrn a značně snižují mechanické vlastnosti za pokojových i zvýšených teplot. Vyšší obsah hliníku může způsobit primární precipitaci nitridů hliníku na úkor vzniku karbidů nebo karbonitridů niobu a hlavně nitridu vanadu. [3, 17]

**Síra, fosfor**

Pro dosažení dobrých plastických vlastností při dostatečně vysoké pevnosti je nutné zajistit metalurgickou čistotu 9 % Cr ocelí udržením obsahů prvků, jako je síra a fosfor, na nejnižší možné úrovni. Metalurgickou čistotu pak lze hodnotit podle faktorů J a X dle následující rovnice. [3]

$$J = (Mn + Si) \cdot (P + Sn) \cdot 10^4 \quad (\%) \quad (3)[3]$$

$$X = 10P + 5Sb + 4Sn + As/100 \quad (\text{ppm}) \quad (4)[3]$$

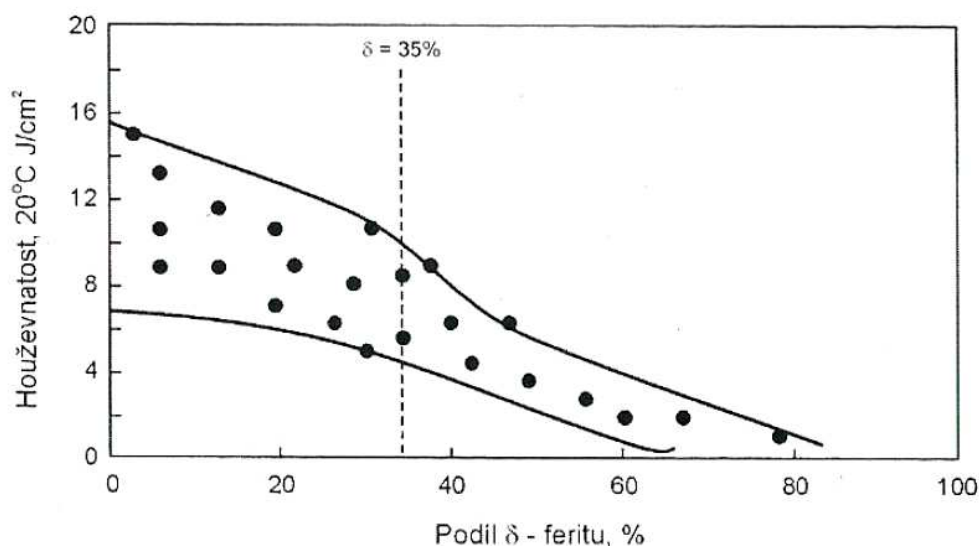
Zpravidla je vyžadováno, aby J faktor byl menší než 100 a faktor X menší než 20. Vliv obsahu fosforu a síry je také negativní na svařitelnost 9 % Cr modifikovaných ocelí a na hodnoty nárazové práce. V těchto ocelích jsou hodnoty síry omezovány na obsah max. 0,01 hm. % a fosforu na max. 0,015 hm. % pro zachování vyhovujících plastických vlastností za normálních teplot i creepové expozici. [3]

**2.2 Struktura 9 – 12 % Cr modifikovaných ocelí**

Tyto modifikované 9 – 12 % Cr oceli jsou používány v kaleném stavu po ochlazení na vzduchu s následným popouštěním. Austenitizace je zpravidla prováděna 30 – 50° C nad teplotou přeměny  $A_{c3}$ , která se pohybuje v rozmezí 1020 – 1100° C a vyvolává rozpuštění téměř všech karbidů a nitridů v matici. V případě nerozpuštění karbonitridů niobu v průběhu austenitizace dochází k zásadnímu zmírnění růstu zrna. Teplota popouštění je volena v rozmezí 600 až 800° C na základě chemického složení a požadovaných vlastností. Tyto oceli jsou pak charakteristické popuštěnou martenzitickou strukturou obsahující karbidy  $M_{23}C_6$  a disperzní fáze typu MX a MN i  $\delta$ -ferit. [7]

**Ferit delta ( $\delta$ )**

Pro dosažení celkové martenzitické struktury u těchto 9 – 12 % Cr ocelí je zapotřebí umožnit vznik austenitu, který nebude obsahovat  $\delta$ -ferit v průběhu ochlazování i celé transformace austenitu na martenzit při ochlazování z kalící teploty, která se pohybuje okolo 1050° C. To je však zároveň podřízeno také obsahem austenitotvorných (Ni, Mn, Co, C, N) i feritotvorných (Cr, Si, Mo, W, V, Nb) prvků a zároveň rychlostí ochlazování. Za snahou vyvážit poměr těchto prvků, pak dochází k stabilizaci  $\delta$ -feritu za vysokých teplot, která vede ke snížení prokalitelnosti, vrubové houževnatosti a zhoršení svařitelnosti. Vliv obsahu  $\delta$ -feritu na hodnoty vrubové houževnatosti je znázorněn na **obr. 8**. [7]



**Obr. 8** – Vliv obsahu  $\delta$ -feritu na hodnoty vrubové houževnatosti [7]

### Karbidy $M_{23}C_6$

Patří mezi hlavní precipitáty modifikovaných 9 – 12 % Cr ocelí, které obsahují prvky, jako jsou Cr, Fe, Mo a W. Karbidy vznikající při vysoké teplotě popouštění mají tu vlastnost, že se vytváří po hranicích zrn popouštěných latěk martenzitu a zabraňují růstu zrn feritu při rekrystalizaci a zotavení. Další vlastnost těchto karbidů je ta, že zvyšují mez pevnosti při tečení z důvodu vyloučení v disperzní formě po hranicích zrn i subzrn a zmírňují pokluzy hranic zrn. Tepelná stabilita těchto karbidů  $M_{23}C_6$  není tak vysoká, z toho důvodu je karbid  $M_{23}C_6$  v praktických podmínkách nežádoucí fází. S narůstající dobou tečení mění své chemické složení a mají sklon ke změně morfologie. Zpravidla dochází ke zhrubnutí a rozdělení částic v matici. To vše pak má za následek snížení mechanických vlastností a usnadnění podmínek pro vznik možných zárodků a dutin po hranicích zrn feritu. [7]

### Fáze MX a $M_2X$

Jedná se o karbonitridy (kde  $M = V, Nb$  a  $X = C, N$ ), které mají disperzní formu a jsou sekundárně vylučovány při teplotách okolo 700° C. Při vyloučení uvnitř zrn a subzrn dochází k zakotvení dislokací a bránění procesu zotavení. Tyto fáze MX mají vysokou tepelnou a morfologickou stabilitu. Nitrity a karbidy MX jsou vzájemně zcela rozpustné a tvoří souvislé tuhé roztoky karbonitridů. [3, 7, 18]

Fáze  $M_2X$  se v 9 – 12 % Cr ocelí vyskytují pouze ojediněle a to jako přechodová fáze. K precipitaci této fáze dochází zejména uvnitř latěk martenzitu. K precipitaci částic  $M_2X$  v případě rotorových ocelí může dojít v průběhu prvního stupně popouštění za teploty

570°C, kde se tyto částice zachovávají v mikrostruktuře i po následném popouštění za vyšší teploty. Se zvýšením teploty při creepové expozici dochází k poklesu stability těchto částic a mohou být nahrazeny stabilnější fází, jako je MX. [3, 7, 19]

### **Lavesova fáze**

Tato fáze  $\text{Fe}_2(\text{Mo}, \text{W})$  je vylučována v modifikovaných 9 – 12 % Cr ocelí, které obsahují přísady molybdenu a wolframu. Vylučování této fáze v oceli nastává už při obsahu molybdenu 0,6 hm. %. Stabilita Lavesovy fáze typu  $\text{Fe}_2\text{Mo}$  je až do teplot kolem 650° C a fáze typu  $\text{Fe}_2\text{W}$  do teplot okolo 750° C. V Lavesově fázi se mimo železa, wolframu a molybdenu může rozpouštět i chrom a křemík. Vyšší obsah křemíku má vliv na zvýšení stability Lavesovy fáze. Částice Lavesovy fáze jsou charakteristické vysokou hustotou defektů a mnohdy vznikají na minoritních fázích, jako jsou  $\text{M}_{23}\text{C}_6$  nebo MX. Výskyt částic je upřednostňován zejména na hranicích původních austenitických zrn nebo subzrn. [3]

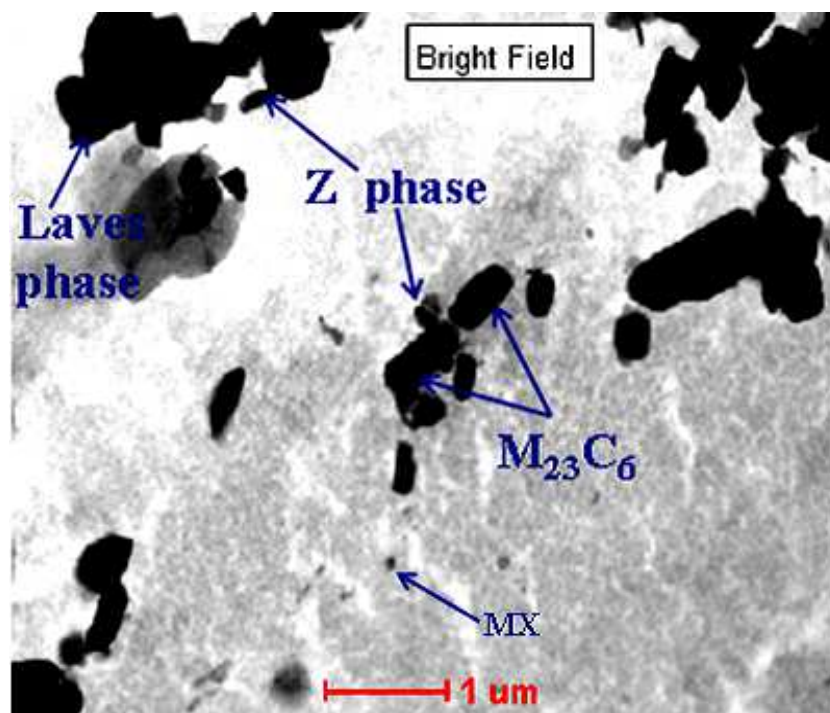
K výskytu Lavesovy fáze nedochází u modifikovaných 9 – 12 % Cr ocelí za výchozího stavu, nýbrž dochází k vylučování při tečení za teplot okolo 600° C. Pokud k tomuto ději dojde, hlavní zpevňující vliv při tečení zastávají precipitáty  $\text{Fe}_2(\text{Mo}, \text{W})$  a narůstání těchto precipitátů je výraznější v porovnání s karbidy  $\text{M}_{23}\text{C}_6$ . Mezi prvky, které omezují precipitaci a růst Lavesovy fáze se řadí bór, který taktéž přispívá ke zvýšení pevnosti při tečení. [7]

### **Z - fáze**

Jedná se o modifikovanou fázi nitridů Cr (Nb, V)N, jejichž nukleační rychlost je velice nízká. Tyto částice Z-fáze se vylučují v podobě tenkých rychle rostoucích destiček, které nepřispívají k precipitačnímu zpevnění. Chemické složení modifikované Z – fáze závisí na teplotě expozice a také na chemickém složení dané oceli. Rozlišuje se modifikovaná Z – fáze v 9 – 12 Cr ocelí a ideální Z – fáze (Nb, Cr)N, jejichž hlavní rozdíl je založen v částečné substituci atomů niobu s vanadem. Modifikované částice Z – fáze si uchovávají tvar tenkých destiček i po delší době expozice. Z hlediska toho, že je vylučování Z – fáze doprovázeno rozpouštěním jemných vytvrzujících částic MX nebo  $\text{M}_2\text{X}$ , dochází při této precipitaci k výraznému degradačnímu mechanismu 9 – 12 Cr ocelí, které obsahují vanad, niob a dusík. [8, 20]

**Fáze  $M_6X$** 

Jde o hrubé částice objevující se v mikrostruktuře 9 – 12 % Cr ocelí, kde  $X = (C, N)$ . Podporování tvorby těchto částic způsobují vyšší obsahy prvků, jako jsou molybden a wolfram. Precipitace fáze  $M_6X$  s sebou nese rozpouštění jemných částic  $M_2X$  a v některém případě i částic  $MX$ . Fáze  $M_6X$  rozpouští značné množství molybdenu, wolframu, chromu, niklu a navíc i menší množství křemíku, vanadu a železa. Tyto hrubé částice  $M_6X$  se nepodílí na precipitačním zpevnění oceli. Naopak, vyšší obsahy molybdenu a wolframu mají za následek, že precipitace této fáze snižuje pevnost tuhého roztoku, tudíž je precipitace částic  $M_6X$  důležitým mechanismem pro degradaci struktury modifikovaných 9 – 12 % Cr ocelí. [8, 14, 23]



**Obr. 9** – Lavesova fáze, Z-fáze, částice  $M_{23}C_6$  a  $MX$  v mikrostruktuře oceli P92 [29]

### 2.3 Ocel P91

Tato již zmiňovaná žárovevná ocel P91(X10CrMoVNb9-1) je hlavním představitelem kategorie moderních modifikovaných 9 – 12 % Cr ocelí. Dříve v České republice byla ocel P91 označována jako 17 119. Tato modifikovaná ocel byla od počátku vyvíjena různými výzkumnými programy jak v Evropě, tak i v USA a Japonsku s ohledem na aplikaci pro energetické zařízení s ultra kritickými parametry páry. V **tab. 5** je uvedeno chemické složení oceli P91. [3]

Mechanické vlastnosti této modifikované 9 % Cr oceli dovolují výrazné zredukování tloušťky stěn potrubí oproti oceli P22 a X20CrMoV 12-1. Tato redukce umožní následným konstrukcím snížit hmotnost a také náklady. V **tab. 6** jsou uvedeny mechanické vlastnosti oceli P91. [3]

**Tab. 5 – Chemické složení oceli P91 [3]**

| C         | Mn        | Si        | P          | S           | Ni        |
|-----------|-----------|-----------|------------|-------------|-----------|
| 0,08-0,12 | 0,30-0,60 | 0,20-0,50 | max. 0,020 | max. 0,010  | max. 0,40 |
| Cr        | Mo        | V         | Nb         | N           | Al        |
| 8,0-9,5   | 0,85-1,05 | 0,18-0,25 | 0,06-0,10  | 0,030-0,070 | max. 0,02 |

**Tab. 6 – Mechanické vlastnosti oceli P91 [3]**

| Ocel                     | R <sub>p0,2</sub><br>[MPa] | R <sub>m</sub><br>[MPa] | A <sub>5</sub><br>[%] |            | KV<br>[J]  |            |
|--------------------------|----------------------------|-------------------------|-----------------------|------------|------------|------------|
|                          |                            |                         | podél                 | napříč     | podél      | napříč     |
| T/P91<br>(X10CrMoVNb9-1) | min. 450                   | 620-850                 | min.<br>19            | min.<br>17 | min.<br>68 | min.<br>41 |

Zásadním faktorem z hlediska fyzikálních veličin je teplotní součinitel tepelné roztažnosti a součinitel tepelné vodivosti. Tyto vlastnosti určují vhodné využití oceli P91 pro stavbu energetických zařízení. Ocel P91 taktéž vykazuje vysoké hodnoty vrubové houževnatosti i při zvýšených teplotách. Při experimentu prováděném v rozmezí teplot -80° C až +20° C bylo dosaženo hodnot nárazové práce v rozsahu 110 – 205 J. Hodnoty tvrdosti této modifikované 9 % Cr oceli jsou vztaženy na aplikovaných parametrech režimu tepelného zpracování. Dominantní vliv na tvrdost oceli P91 má teplota a výdrž popouštění. Po popouštění se tvrdost martenzitu pohybuje na relativně nízké úrovni okolo hodnot 250 HV30, z důvodu nižšího obsahu uhlíku. [3, 21]

## 2.4 Ocel P92

V kategorii modifikovaných 9 – 12 % Cr ocelí pro energetiku má bezesporu na evropském i americkém trhu dominantní postavení právě ocel P92, která se také někdy objevuje pod názvem T92 nebo NF616. Tato japonská ocel za teploty 600° C dosahuje hodnot 110 – 120 MPa při tečení  $R_{mT/10^5 \text{ h./600}^\circ\text{C}}$ . Oproti předcházející oceli P91 byla tato ocel navíc dolegována malým obsahem wolframu. [7, 8]

**Tab. 7 – Chemické složení oceli P92 [24]**

| C         | Mn        | Si    | P <sub>max</sub> | S <sub>max</sub> | Ni   | Cr      | Mo        |
|-----------|-----------|-------|------------------|------------------|------|---------|-----------|
| 0,07-0,13 | 0,30-0,60 | ≤0,50 | 0,02             | 0,01             | ≤0,4 | 8,5-9,5 | 0,30-0,60 |

| V         | Ti      | W     | Al <sub>celk.</sub> | Nb        | B           | N           |
|-----------|---------|-------|---------------------|-----------|-------------|-------------|
| 0,15-0,25 | < 0,004 | 1,5-2 | ≤0,04               | 0,04-0,09 | 0,001-0,006 | 0,030-0,070 |

**Tab. 8 – Mechanické vlastnosti oceli P92 [24]**

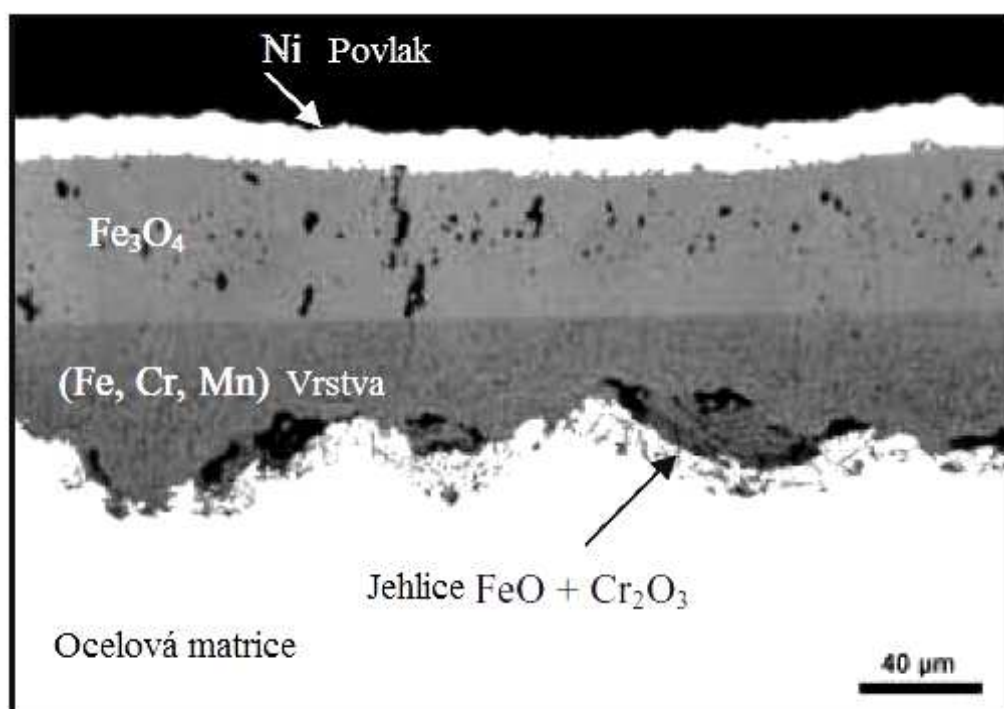
| Ocel                     | R <sub>p0,2</sub><br>[MPa] | R <sub>m</sub><br>[MPa] | A <sub>5</sub><br>[%] |            | KV<br>[J]  |            |
|--------------------------|----------------------------|-------------------------|-----------------------|------------|------------|------------|
|                          |                            |                         | podél                 | napříč     | podél      | napříč     |
| T/P92<br>(X10CrMoVNb9-2) | min. 440                   | 620-850                 | min.<br>19            | min.<br>17 | min.<br>40 | min.<br>27 |

U této oceli byl omezen obsah dusík z důvodu potlačení vazby na bór. Stabilita mikrostruktury oceli P92 je kladně ovlivněna malou rychlostí hrubnutí částic  $M_{23}C_6$ , které jsou spjatý s rozpouštěním atomů bóru v dané fázi. V průběhu žhání nebo creepové expozice nastává výrazná precipitace Lavesovy fáze typu  $Fe_2W$  a tyto částice pak tvoří zárodky na částicích  $M_{23}C_6$ , tudíž nedojde k precipitačnímu zpevnění vlivem těchto částic. Samotná precipitace Lavesovy fáze však nemá značný vliv na pokles meze pevnosti při tečení oceli P92. Vlivem velké rychlosti růstu částic  $Fe_2W$ , jsou pak tyto částice v mikrostruktuře na konci etapy růstu nejhrubší. Rychlost růstu částic Lavesovy fáze je výrazně menší, je možné ji přibližně srovnat s rychlostí růstu částic  $M_{23}C_6$ . Vzhledem k nízkému výskytu relativně malých částic sekundární fáze MX, probíhají v oceli P92 procesy jako zotavení, tvorba zrn a subzrn velmi pomalu. To může být zapříčiněno přítomností bóru, který má vliv na mobilitu dislokací. [8, 25, 26, 27]



### 2.4.1 Odolnost oceli P92 proti oxidaci v páře

Tato vlastnost je pro ocel P92 a pro ostatní oceli používané pro parovody nesmírně důležitá. Některé experimenty při dlouhodobém tečení ukazují výsledky, které přiřazují oceli P92 vynikající odolnost proti oxidaci na vzduch. Nicméně v prostředí páry okolo teploty 620 °C jsou fyzikální pochody degradace odlišné. Dochází k vytvoření tenkých oxidických vrstev. Vnější oxidická vrstva je tvořena  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  a vnitřní dvoufázová je tvořena vrstvami  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  a  $(\text{Fe}, \text{Cr}, \text{Mn})_3\text{O}_4$ . [28]



**Obr. 10** – Oxidické vrstvy na povrchu oceli P92 [28]

Vlivem oxidace dochází k mnohé řadě problémů. Jedním z nich je úbytek materiálu a tím ztenčování tloušťky stěny trubky, což s sebou nese snížení životnosti. Druhý problém nastává ve chvíli, kdy dojde k narušení vytvořené oxidické vrstvy a odlupování částí této vrstvy. Oddělené částice pak mohou způsobit erozivní narušování materiálu na jiných místech. Některé články uvádí, že zlepšení oxidačních vlastností by bylo docíleno zvýšením obsahu chromu na 11 % hm., kdy se na materiálu vytvoří dostatečně ochranná vrstva. [28]

## 2.5 Svařitelnost ocelí P91 a P92

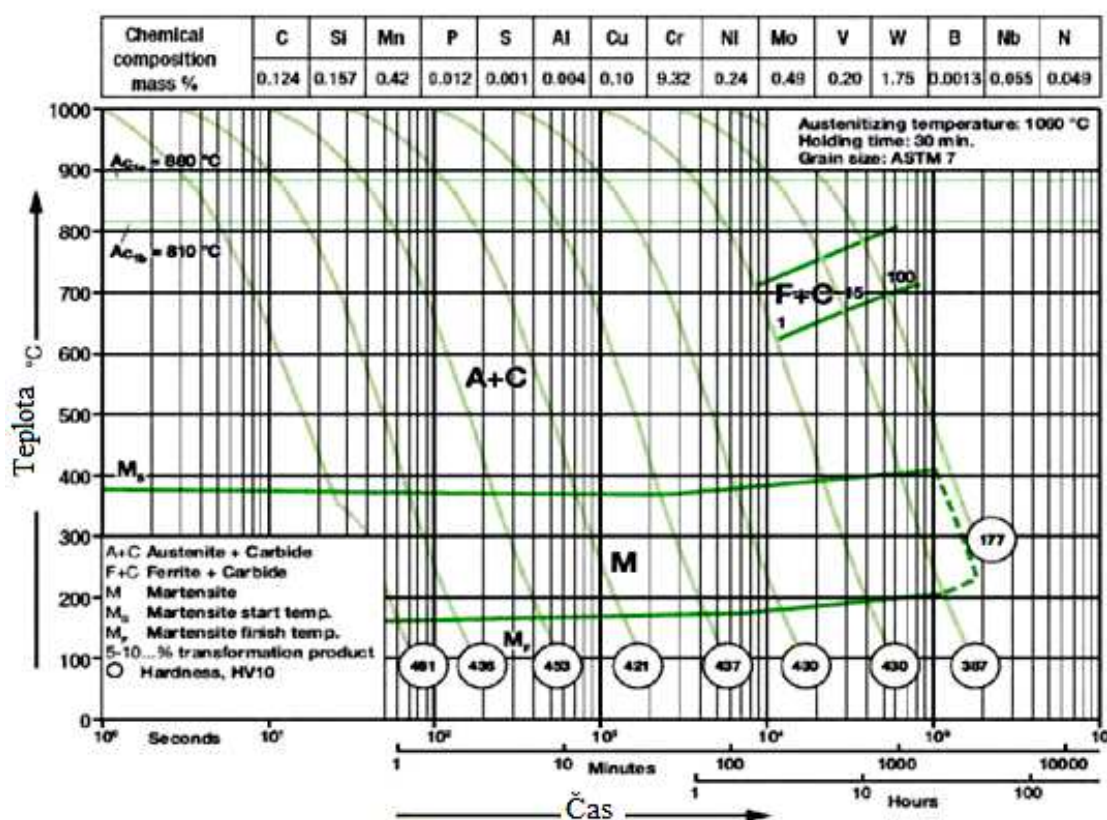
Oceli P91 a P92 byly od samého prvopočátku vyvíjeny s důrazem na jejich svařitelnost. Z hlediska svařitelnosti má dominantní vliv nízký obsah uhlíku. Obsah uhlíku v základním materiálu by měl být v porovnání téměř stejný jako ve svarovém kovu, z toho důvodu je očekáván menší pokles žárovevnosti svarového kovu oproti základnímu materiálu. S ohledem na přítomnost martenzitické struktury této oceli a rychlost difuze vodíku v martenzitické mikrostruktuře je nutné používat přídavné materiály, které mají obdobné chemické složení a nízký obsah vodíku do 5 ml/100g svarového kovu. Je nezbytné provádět kontrolu obsahu vodíku ve svarovém kovu. Je nutno dbát na dodržování informací od výrobce o správném režimu sušení přídavných materiálů, jejichž teplota by neměla poklesnout pod 80° C. S požadavkem zachování žárovevnosti svarových spojů těchto ocelí jsou používány přídavné materiály, které obsahují aspoň 0,05 hm. % dusíku a limitované množství hliníku. Dále je nutno s ohledem na vznik Lavesovy fáze omezit obsah niobu na maximální hodnotu 0,05 hm. %. Větší množství niklu ve svarovém kovu oproti základnímu materiálu má za následek vlivné zvýšení hodnot nárazové práce svarového kovu při delší době výdrže na popouštěcí teplotě. Výskyt  $\delta$ -feritu při použití přídavných materiálů pro homogenní svarové spoje ocelí P91/92 je do 1 %. [3, 8, 22]

Modifikované 9 % Cr oceli P91/92 se svařují zásadně s předehřevem v rozsahu teplot 200 – 300° C s ohledem na tloušťku základního materiálu. Je nutné také kontrolovat teplotu interpass, která by neměla překročit 350 °C. V případě, že se svarový spoj po dokončení tepelně nezpracuje, musí být ihned bez meziochlazení proveden dohřev za účelem snížení obsahu difuzního vodíku. Je doporučeno volit teploty v rozmezí 200 – 300° C po minimální dobu 2 hodin. V případě svařování materiálů větších tloušťek je potřeba volit horní hranici teploty a prodloužit dobu dohřevu. [3, 19, 22]

Po dokončení procesu svařování je potřeba svarové spoje ocelí P91/92 tepelně zpracovat popouštěním za teplot 750 – 760° C. Volba doby výdrže je volena s ohledem na dosažení požadovaných hodnot nárazové práce a tvrdosti. Tyto oceli jsou však náchylné na vznik nízkoteplotních žihacích trhlin v důsledku napětí vznikajícího v materiálu způsobené velkými gradienty teplot. Z tohoto důvodu je důležité dodržovat předepsané rychlosti ohřevů a ochlazování svarových spojů, to platí i pro ohřev na teplotu předehřevu. Po svaření spojů a případné aplikaci dohřevu je nutno ochladit spoj pod teplotu  $M_f$ , zpravidla lehce pod 100° C, z důvodu proběhnutí přeměny na martenzit ještě před samotným tepelným zpracováním. [3]

### 3. TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ OCELI P92

Tepelné zpracování 9 -12% Cr modifikovaných ocelí je složeno z normalizačního žhání a vysokoteplotního popouštění. Austenitizace je zpravidla prováděna v rozmezí 30 – 50° C nad teplotou přeměny  $A_{c3}$  (1020-1100° C), kdy dochází k rozpuštění většiny karbidů a nitridů, aniž by byl způsoben výraznější nárůst zrna austenitu. Teplota austenitizace musí být také volena s ohledem na to, aby nedošlo k tvorbě  $\delta$ -feritu, který se nezúčastňuje fázové přeměny při ochlazování a nepříznivě působí na křehkolomové vlastnosti oceli. Karbonitridy niobu, které se nerozpustí při austenitizaci, mají pak výrazný vliv na omezení růstu zrna. Teplota popouštění s ohledem na požadované vlastnosti a chemické složení se volí v rozsahu 730 až 780° C nebo hned pod teplotou přeměny  $A_{c1}$ . Vyšší obsah chromu a dalších legur posouvají křivky rozpadu austenitu k delším časům a způsobují plnou prokalitelnost oceli na vzduchu. Výslednou strukturou po ochlazení na vzduchu je laťkový martenzit, jehož tvrdost je závislá na rychlosti ochlazování z austenitizační teploty. Při velmi pomalém ochlazování dojde k markantnímu poklesu tvrdosti, což vede i k poklesu žárovevných vlastností oceli. [3, 7]



Obr. 11 – ARA diagram oceli P92 [30]

### 3.1 Vliv tepelného zpracování na mechanické vlastnosti oceli P92

Pro tento experiment ověřování vlivu tepelného zpracování na mechanické vlastnosti byla použita ocel P92 o charakteristickém chemickém složení, které je uvedeno v **tab. 9**. Dodané zkušební vzorky oceli P92 pro experiment poskytla firma Nippon Steel. Na jednotlivé vzorky byly aplikovány různé režimy tepelného zpracování, ty se lišily austenitizační teplotou, která byla použita v rozmezí 970 – 1145 °C a teplotou popouštění. Teploty popouštění byly použity s ohledem na možnost rozdílného efektu zotavení martenzitu, který má vliv na rozdílné výsledky dislokačního zpevnění. [5]

**Tab. 9** – Chemické složení oceli P92 od firmy Nippon Steel [5]

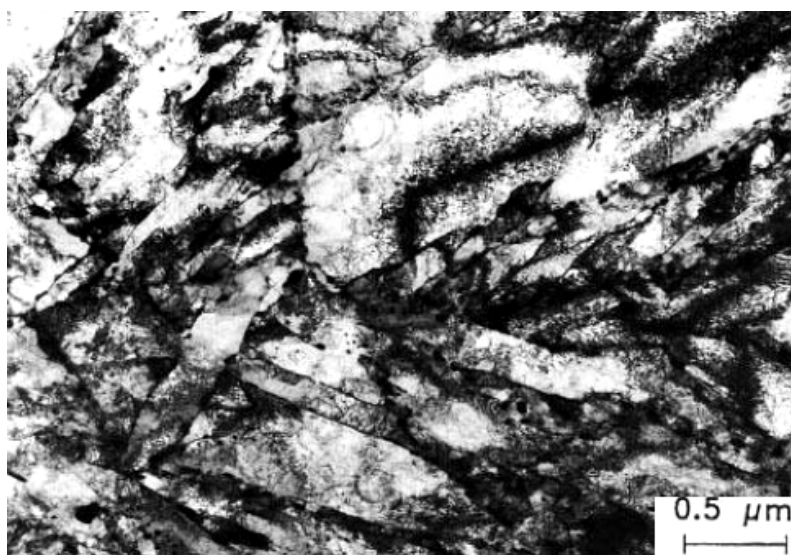
| C    | Mn   | Si   | P     | S     | Ni    | Cr    |
|------|------|------|-------|-------|-------|-------|
| 0,12 | 0,47 | 0,02 | 0,011 | 0,006 | 0,06  | 9,07  |
| Mo   | V    | W    | Nb    | N     | Al    | B     |
| 0,46 | 0,19 | 1,78 | 0,063 | 0,043 | 0,002 | 0,003 |

V jednom případě bylo záměrně voleno tepelné zpracování, při kterém byla výsledná struktura plně feritická, aniž by došlo k martenzitické přeměně. Vzorek byl podroben austenitizaci při teplotě 1070 °C po dobu 2 hodin, ochlazen v peci na teplotu 780 °C a následně popuštěn s dlouhou výdrží 8 hodin. Tímto pochodem se docílilo potlačení martenzitické přeměny a bylo dosaženo celkové feritické matrice v oceli. Toto tepelné zpracování bylo zařazeno z důvodu následného posouzení vlivu martenzitické transformace na creepové vlastnosti. [5]

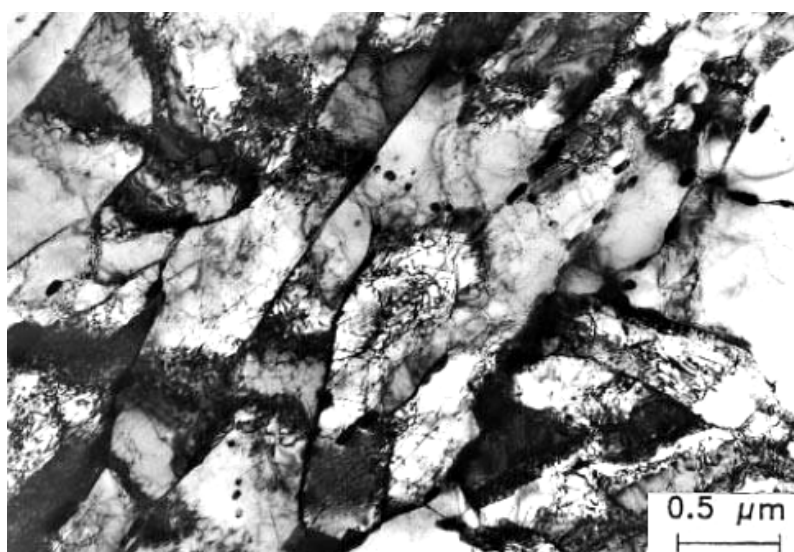
**Tab. 10** – Výsledné mikrostruktury při různých režimech TZ [5]

| Austenitizace | Popouštění  | Výsledná mikrostruktura                                       |
|---------------|-------------|---|
| 1070 °C / 2 h | 715 °C / 2h | Martenzit, zvýšený stupeň zotavení, snížená hustota dislokací |
| 1070 °C / 2 h | 775 °C / 2h |   |
| 1070 °C / 2 h | 835 °C / 2h |   |
| 970 °C / 2 h  | ...         | Martenzit, nárůst velikosti původních austenitických zrn      |
| 1145 °C / 2 h | ...         |   |
| 970 °C / 2 h  | 775 °C / 2h |   |
| 1145 °C / 2 h | 775 °C / 2h |   |
| 1070 °C / 2 h | 780 °C / 8h | Feritická matrice (bez martenzitické přeměny)                 |

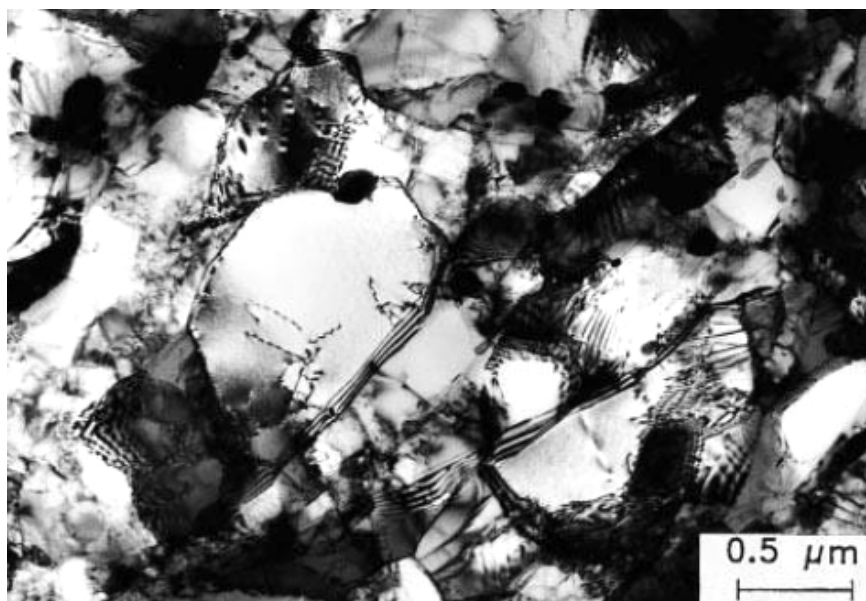
V průběhu popouštění byly pozorovány dva hlavní procesy, zotavení doprovázené snížením hustoty dislokací a tvorbou subzrna a dislokačních sítí. Tyto procesy byly urychlovány s narůstající teplotou popouštění. Za nejnižší popouštěcí teploty  $715^{\circ}\text{C}$  došlo v menší míře ke zvýšení hustoty dislokací oproti popouštění za vyšších teplot. U popouštění při nejvyšší aplikované teplotě  $835^{\circ}\text{C}$  došlo ke značnému snížení hustoty dislokací okolo 75 %. Z hlediska mikrostruktury se velikosti částic  $\text{M}_{23}\text{C}_6$  a jemných částic MX výrazně nelišily v porovnání všech použitých režimů. Výsledná mikrostruktura oceli P92 při teplotě austenitizace  $1070^{\circ}\text{C}$  a různých teplot popouštění je zobrazena na **obr. 12, 13, 14**. [5]



**Obr. 12** – Mikrostruktura oceli P92, austenitizace  $1070^{\circ}\text{C}/2\text{ h}$ , popouštění  $715^{\circ}\text{C}/2\text{ h}$  [5]

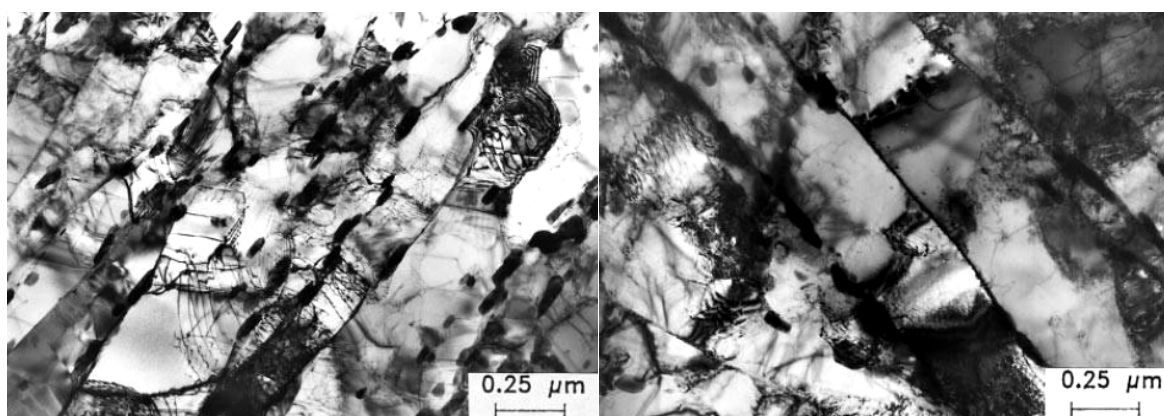


**Obr. 13** – Mikrostruktura oceli P92, austenitizace  $1070^{\circ}\text{C}/2\text{ h}$ , popouštění  $775^{\circ}\text{C}/2\text{ h}$  [5]



**Obr. 14** – Mikrostruktura oceli P92, austenitizace 1070° C/2 h, popouštění 835° C/2 h [5]

Vliv volby různé teploty austenitizace se projevil určitými mikrostrukturními vlastnostmi. Hlavní zaznamenaná změna byla ve zvětšení šířky latěk a v nárůstu původních austenitických zrn, které se zvětšovaly z 10 μm (při 970°C) na 20 μm (při 1070°C) a na konečných 60 μm (při 1145°C). Na **obr. 15** je znázorněna změna velikosti původních austenitických zrn vlivem různé velikosti teploty austenitizace po dobu výdrže 2 hodiny a následným popouštěním 775° C / 2 h. [5]



**Obr. 15** – Mikrostruktura oceli P92, levá strana - austenitizace 970° C/2 h, pravá strana - austenitizace 1145° C/2 h [5]



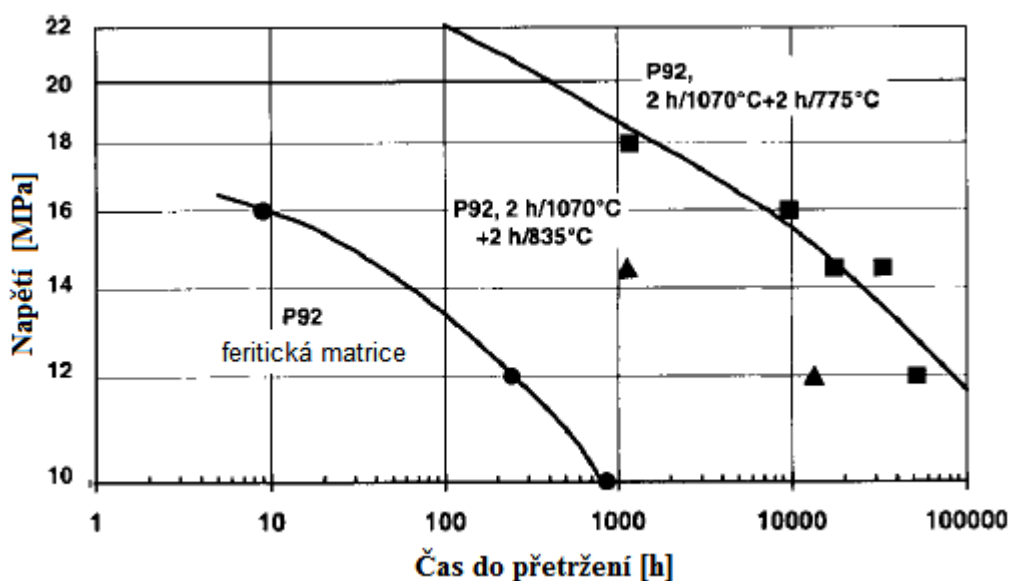
Vliv tepelného zpracování na mechanické vlastnosti byl vyhodnocován pomocí mechanických zkoušek, které se skládaly z tahové zkoušky a ze zkoušky při tečení. Testování bylo prováděno za teplot 20, 600 a 650° C s deformační rychlostí  $10^{-3}$ /s. Byla vyhodnocována mez kluzu, mez pevnosti a tažnost do přetržení. Výsledky ukázaly podobné hodnoty mechanických vlastností téměř všech režimů tepelného zpracování. Výjimkou byl zkušební vzorek, který byl podroben teplotě austenitizace 1070° C po dobu 2 hodin a následně popuštěn za teploty 715° C a výdrž 2 h. Takto nízká teplota popouštění měla za následek výrazné zvýšení pevnosti zejména při pokojové teplotě a to z důvodu vyšší hustoty dislokací. Z hlediska hodnocení tažnosti při tomto zmíněném režimu tepelného zpracování došlo k mírnému poklesu hodnot. [5]

**Tab. 11 – Výsledky mechanických zkoušek pro různé režimy TZ oceli P92 [5]**

| T <sub>aust</sub><br>[°C] | T <sub>pop</sub><br>[°C] | Rp <sub>0,2</sub><br>[MPa] |        |        | R <sub>m</sub><br>[MPa] |        |        | A <sub>5</sub><br>[%] |        |        |
|---------------------------|--------------------------|----------------------------|--------|--------|-------------------------|--------|--------|-----------------------|--------|--------|
|                           |                          | 20° C                      | 600° C | 650° C | 20° C                   | 600° C | 650° C | 20° C                 | 600° C | 650° C |
| 970                       | 775                      | 543                        | 349    | 286    | 709                     | 374    | 297    | 23                    | 31,8   | 35,2   |
| 1070                      | 715                      | 792                        | 482    | 400    | 911                     | 495    | 410    | 18,3                  | 26,8   | 28,3   |
| 1070                      | 775                      | 513                        | 331    | 279    | 683                     | 356    | 285    | 25,1                  | 31,8   | 38,9   |
| 1070                      | 835                      | 480                        | 314    | 269    | 661                     | 342    | 282    | 26,2                  | 35,1   | 37,2   |
| 1145                      | 775                      | 591                        | 375    | 315    | 739                     | 394    | 324    | 21,6                  | 30,5   | 35,2   |
| -                         | -                        | 440                        | -      | -      | 620                     | -      | -      | 20                    | -      | -      |

Zkušební vzorek, kde byla přítomna celková feritická mikrostruktura, vykazoval značné množství jemných precipitátů a karbonitridů. Lze předpokládat, že tato mikrostruktura nemůže poskytnout dostatečné hodnoty pevnosti při tečení. Z toho vyplývá, že pro vývoj zpevněných 9 % Cr ocelí s použitím do teplot 600° C a výše je nutné, aby při tepelném zpracování proběhla transformace s výslednou martenzitickou strukturou. Proto je zapotřebí volit i dostatečně velkou rychlost ochlazování z teploty austenitizace. Maximální pracovní teplota musí být vždy nižší, než je teplota popouštění. V tomto případě pak nedochází k výraznému zvýšení rychlosti zotavení martenzitické struktury. [5]

Kontrola mikrostrukturních parametrů u modifikovaných 9 – 12 Cr ocelí je ve vzájemném vztahu s vlastnostmi při tečení. Změny strukturních vlastností jsou důležité v závislosti na odlišném chování při zkouškách tečení, a jak se tyto vlastnosti mění s rostoucí dobou expozice. Tyto změny mohou a měly by být brány v úvahu při přiblížení experimentu zkoušky tečení a určení požadované životnosti. To znamená, že mez pevnosti v tečení daného materiálu nemůže být přeceňována. Na **obr. 16** je znázorněno chování oceli P92 při tečení. Přestože se jedná o jednu ocel, následkem různých režimů tepelného zpracování vznikly dvě odlišné mikrostruktury, které jsou porovnávány. [5]



**Obr. 16** – Porovnání pevnosti do přetržení při 600° C [5]

Z výsledků experimentu, který je graficky znázorněn na **obr. 16**, je zřetelný rozdíl v chování při dlouhodobé expozici. Tepelné zpracování, které je složeno z austenitizace při teplotě 1070° C po dobu dvou hodin a následného dlouhého 8 hodinového popouštění na teplotě 780° C, mělo za následek výslednou strukturu s feritickou maticí. Tato struktura v porovnání s martenzitickou strukturou vzniklou jiným režimem tepelného zpracování vykazuje znatelně horší vlastnosti za zvýšených teplot. Je zřejmé, že martenzitická transformace značně přispívá ke zlepšení pevnosti při tečení 9 % Cr ocelí. Přestože martenzitická struktura degeneruje na feritickou, je hustota dislokací zpočátku vysoká, ta však klesá s dobou expozice. Původní martenzitická struktura pak neumožňuje tvorbu stabilních subzrn, které mají společně s jemnými karbidy a nitridy za následek vysokou mez pevnosti při tečení. [5]



### 3.2 Vliv tepelného zpracování svarových spojů oceli P92 na creepové vlastnosti

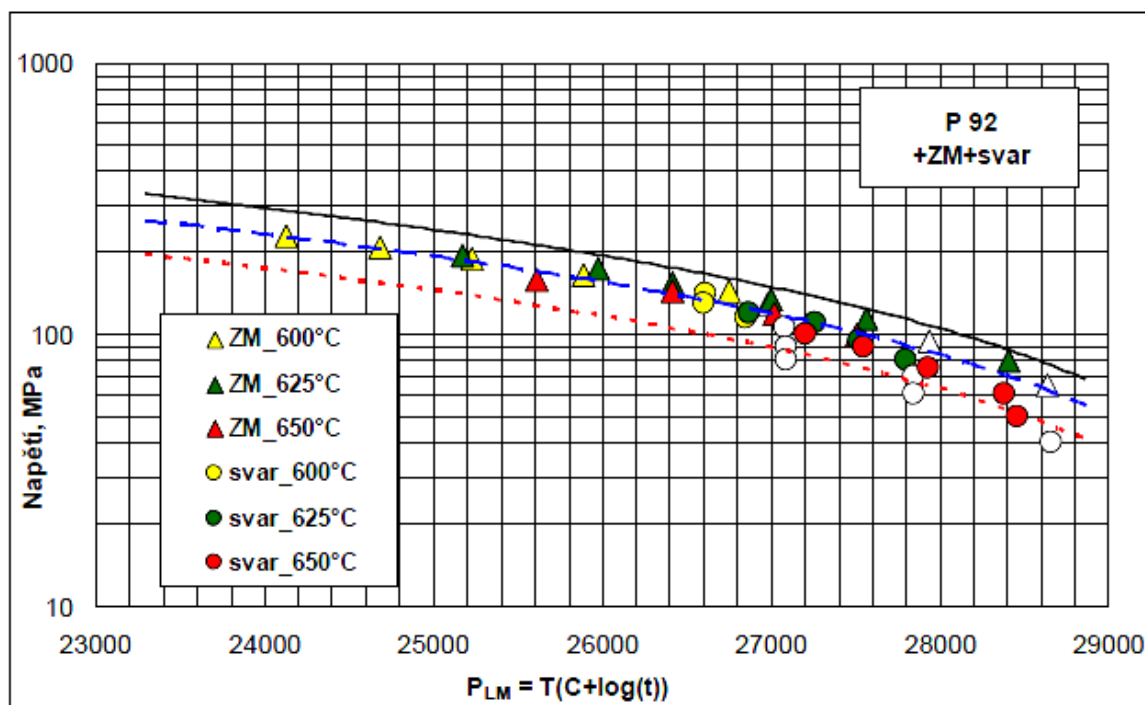
Z důvodu posouzení vlivu tepelného zpracování svarových spojů oceli P92 byly provedeny zkoušky tečení. Dané zkoušky pak přiblíží reálné chování oceli P92 v pracovním zatížení, kdy je tato ocel dlouhodobě vystavena teplotám okolo 600° C a tlakům 30 MPa. Zkouškám tečení byl podroben základní materiál i svarový spoj při teplotách zkoušení 600, 625 a 650° C. Pro každou z navržených teplot bylo zhotoveno 6 zkušebních tyčí. Celková doba zkoušení činila 173 830 hodin. Výsledky byly zpracovány a graficky znázorněny pomocí přepočtu experimentálních dat dle Larson – Millerovy parametrické rovnice: [24]

$$P_{LM} = T(C + \log(t)) \quad (5)[24]$$

T – teplota v Kelvinech

t – doba do lomu v hodinách

C – Larson Millerova konstanta



**Obr. 17** – Závislost napětí na hodnotě Larson - Millerova parametru pro hodnocení svarový spoj i základní materiál oceli P92 [24]

Výsledky ze zkoušek tečení ukázaly relativně uspokojivé výsledky jak základního materiálu, tak i svarového kovu. Úroveň žárovevnosti základního materiálu se pohybuje ve větší míře v blízkosti spodní toleranční hranice. Žárovevnost svarového spoje dosahuje téměř srovnatelných hodnot s hodnotami základního materiálu. S narůstajícím časem do lomu a hlavně při vyšších teplotách úroveň žárovevnosti svarového spoje oceli P92 klesá a data se přibližují spodní toleranční hranici. Výsledky ukazují, že při dlouhodobém tečení už není dosahováno tak uspokojivých hodnot. Byla potvrzena předpokládaná situace, která zpochybňuje možnost udržení vysoké odolnosti vůči tečení s delšími časy do lomu. Důsledkem tohoto zjištění, které je srovnatelné i v případě použití jiných precipitačně vytvrzených nízkolegovaných a modifikovaných chromových ocelí, je značná redukce zpevnění hlavně v interkritické oblasti teplem ovlivněné zóny. [24]

Pozorovaný a zkoušený svarový spoj oceli P92 se svými vlastnostmi výrazně neodlišuje od ostatních 9 – 12 % Cr modifikovaných ocelí, které jsou charakteristické značným poklesem úrovně žárovevnosti svarového spoje oproti základnímu materiálu. Přestože byl zaznamenán pokles i v tomto experimentu, hodnoty se nacházely neustále v povoleném tolerovaném pásmu platném pro ocel P92. [24]

## 4 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Podstata experimentální části diplomové práce spočívala ve zhotovení zkušebních desek a jejich následném svaření danými technologiemi, dále se svařené desky po svařování dohřály, a aplikovalo se různé tepelné zpracování. Nakonec, jako nejdůležitější část experimentu byly desky podrobeny zkouškám na mechanické vlastnosti. Jak již z celé práce vyplývá, jedná se o desky oceli P92 (X10CrWMoVNb9-2) jisté tavby číslo 54 380 o charakteristickém chemickém složení, které je uvedeno níže. Desky z oceli P92 dodala pro umožnění experimentu firma Flash Steel Power, a.s., tloušťka dodaných desek byla 18 mm. Na ocelových deskách byla provedena úprava svarových ploch dle normy ČSN EN 29 692. Samotné svařování proběhlo ve svařovnách Katedry mechanické technologie VŠB – TUO a Českého svářečského ústavu s.r.o. v Ostravě. Veškeré postupy a zkoušení, které jsou v této práci obsaženy, byly provedeny v souladu s normou ČSN EN ISO 15614-1, která se zabývá stanovením a kvalifikací postupů svařování oceli, Ni a slitin Ni.

### 4.1 Provedení zkušebních svarových spojů technologiemi 141 a 111 na deskách tloušťky 18 mm

Provedení samotného svařování bylo uskutečněno zkušeným kvalifikovaným svářečem s dlouholetou praxí, jehož jméno a kvalifikace jsou uvedeny v záznamu o svařování. Bylo svařeno celkem pět zkušebních desek tloušťky 18 mm o rozměrech 250 x 250 mm. Na všech svařovaných deskách byl aplikován přehřev i dohřev, tepelné zpracování po svařování bylo pak použito na každou svařenou desku různé.

#### 4.1.1 Informace o základním materiálu

Základním materiálem jsou desky z oceli P92 (X10CrWMoVNb9-2) tloušťky 18 mm. Tyto desky byly připraveny z tavby 54 380 a byly dodány v zušlechťeném stavu. Materiál byl po vykování podroben austenitizaci při teplotě 1060 °C, a to po dobu 1 hodiny, rychlost ohřevu na austenitizační teplotu byla použita 150 °C·h<sup>-1</sup>. Po austenitizaci následovalo prudké ochlazení pro dosažení nerovnovážné struktury, jako kalící médium byl použit olej. Po kalení následovalo popouštění za teploty 770 °C po dobu 1 hodiny za účelem popouštění martenzitické struktury. Rychlost ohřevu na popouštěcí teplotu byla aplikována 100 °C·h<sup>-1</sup>, dále následovalo ochlazení na teplotu 400 °C při ochlazovací rychlosti 150 °C·h<sup>-1</sup> a konečné volné dochlazení na mírném vzduchu.

Rozbor chemického složení oceli P92 tavby 54 380 je uveden v následující tabulce **tab. 12**, mechanické vlastnosti a hodnoty tvrdosti jsou uvedeny v **tab. 13, 14**.

**Tab. 12** – Chemické složení základního materiálu

| Chemické složení oceli P92 tavby 54380 [hm. %] |      |     |       |        |       |       |       |
|--|------|-----|-------|--------|-------|-------|-------|
| C  | Mn   | Si  | P     | S      | Ni    | Cr    | Mo    |
| 0,109  | 0,44 | 0,3 | 0,016 | 0,0026 | 0,288 | 8,860 | 0,404 |

| V     | Ti      | W    | Al -c | Nb    | B      | N      |
|-------|---------|------|-------|-------|--------|--------|
| 0,191 | < 0,004 | 1,69 | 0,011 | 0,049 | 0,0033 | 0,0481 |

**Tab. 13** – Mechanické vlastnosti a tvrdost základního materiálu při 20 °C

| Hodnoty mechanických vlastností a tvrdosti oceli P92 tavby 54380 |                      |                         |        |                    |       |         |
|--|----------------------|-------------------------|--------|--------------------|-------|---------|
|  | R <sub>m</sub> [MPa] | R <sub>p0,2</sub> [MPa] | KV [J] | A <sub>5</sub> [%] | Z [%] | HB      |
| Předepsáno normou  | 620-850              | >440                    | >41    | >17                | -     | 185-260 |
| Hodnoty tavby 54 380   | 667                  | 447                     | 109    | 24,4               | 62,8  | 220     |

**Tab. 14** – Mechanické vlastnosti a tvrdost základního materiálu při 350 °C

| Hodnoty mechanických vlastností oceli P92 tavby 54380 |                      |                         |                    |       |
|---|----------------------|-------------------------|--------------------|-------|
|   | R <sub>m</sub> [MPa] | R <sub>p0,2</sub> [MPa] | A <sub>5</sub> [%] | Z [%] |
| Předepsáno normou                                     | -                    | > 382                   | -                  | -     |
| Hodnoty tavby 54 380                                  | 531                  | 410                     | 18,8               | 62,8  |

#### 4.1.2 Přídavný materiál

Pro svaření zkušebních desek byla použita technologie 141 pro zavaření kořenové oblasti a následně byla použita technologie 111 pro výplň. Jako přídavný materiál se použil drát a bazická elektroda Thermanit MTS 616 firmy Böhler Thyssen Schweissttechnik. Pro zavaření kořenové oblasti byl použit drát Ø 2 mm, pro obloukové svařování obalenou elektrodou byly použity průměry nejprve Ø 2,5 mm a následně Ø 3,2 mm. Klasifikace přídavných materiálů je dle norem: EN 12070 – WZCrMoWVNb 9 0,5 1,5 a EN ISO 3580-A – EZ CroWVNb 9 0,5 2 B42H5. Tento přídavný materiál je v souladu s normou ASTM A 335, která doporučuje vhodné přídavné materiály pro svařování ocelí trvale

odolávajícím kriticky vysokým teplotám. Použitý přídatný materiál je deklarován od výrobce, jako pro svarové spoje přímo oceli P92. Z důvodu, že byly použity dvě technologie svařování (141 a 111), je uvedeno v **tab. 15** chemické složení přídatného materiálu pro technologii 141 a v **tab. 17** chemické složení elektrody.

**Tab. 15** – Chemické složení přídatného materiálu – drát (v hm. %) [31]

| Thermanit MTS 616 (drát) |      |      |     |     |     |     |     |      |      |
|--------------------------|------|------|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|
| C                        | Si   | Mn   | Cr  | Mo  | Ni  | W   | V   | Nb   | N    |
| 0,1                      | 0,38 | 0,45 | 8,8 | 0,4 | 0,6 | 1,6 | 0,2 | 0,06 | 0,04 |

**Tab. 16** – Mechanické vlastnosti přídatného materiálu při běžné teplotě po tepelném zpracování – drát [31]

| Tepelné zpracování [°C/hod] | Mechanické vlastnosti dle normy EN 1597-1 |          |                    |        |
|-----------------------------|---|----------|--------------------|--------|
|                             | Rm [MPa]                                  | Re [MPa] | A <sub>5</sub> [%] | KV [J] |
| 760°C / ≥ 2 hod             | 720                                       | 560      | 15                 | 41     |

**Tab. 17** – Chemické složení přídatného materiálu – elektroda (v hm. %) [31]

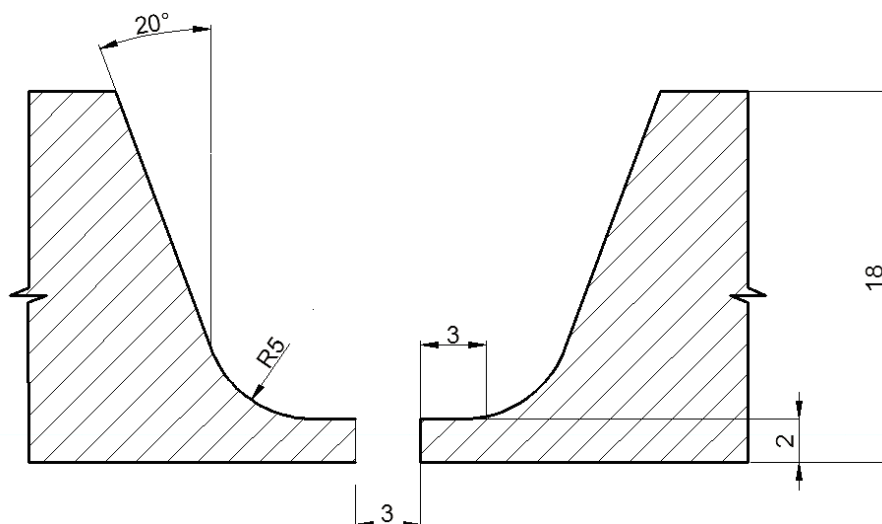
| Thermanit MTS 616 (elektroda) |      |      |     |     |     |     |     |      |      |
|-------------------------------|------|------|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|
| C                             | Si   | Mn   | Cr  | Mo  | Ni  | W   | V   | Nb   | N    |
| 0,11                          | 0,20 | 0,60 | 8,8 | 0,5 | 0,7 | 1,6 | 0,2 | 0,05 | 0,05 |

**Tab. 18** – Mechanické vlastnosti přídatného materiálu při běžné teplotě po tepelném zpracování – elektroda [31]

| Tepelné zpracování [°C/hod] | Mechanické vlastnosti dle normy EN 1597-1 |          |                    |        |
|-----------------------------|---|----------|--------------------|--------|
|                             | Rm [MPa]                                  | Re [MPa] | A <sub>5</sub> [%] | KV [J] |
| 760°C / ≥ 2 hod             | 720                                       | 560      | 15                 | 41     |

#### 4.1.3 Úprava svarových ploch

Svarové plochy na výchozím použitém materiálu oceli P92 byly upraveny dle požadavků v souladu s normou ČSN EN 29 692, která specifikuje tvary a rozměry svarových ploch pro obloukové svařování, svařování v ochranných plynech a plamenové svařování. Svarové plochy byly obrobena frézováním do podoby U svaru, zbylé otřepy byly odstraněny kartáčováním. Úprava svarových ploch s přesnými rozměry úkosů, otupení, zaoblení a kořenové mezery je zobrazena na **obr. 18**.



**Obr. 18** – Úprava svarových ploch

#### 4.1.4 Zhotovení zkušebních svarových spojů oceli P92

Zkušební desky oceli P92 byly svařeny certifikovaným svářečem ve svařovně Katedry mechanické technologie VŠB – TUO a Českého svářečského ústavu, s.r.o. v Ostravě. Svařování probíhalo pouze v poloze PA. Svarové plochy desek byly upraveny, jak již bylo uvedeno, dle požadavků. Na **obr. 19** je zobrazena svařovaná zkušební deska oceli P92 po zavaření kořenové oblasti metodou 141.



**Obr. 19** – Spoj po zavaření kořene metodou 141

Svařovací zdroj pro svařování kořenové oblasti metodou TIG byl použit od firmy Fronius, jedná se o zcela digitálně řízený invertor MagicWave 3000 Comfort G/F, který je zobrazen na **obr. 20** vlevo. Jako ochranná atmosféra sloužil netečný plyn Argon, jehož naměřený průtok činil  $11 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$ , ochranný plyn dodal výrobce SIAD. Wolframová

elektroda byla použita WT 20 o průměru 2,4 mm. Přídavný materiál ve formě drátu, který byl dodáván do svarové lázně ručně, měl průměr 2 mm.



**Obr. 20** – Svařovací zdroj *MagicWave 3000 Comfort G/F a Trans Pocket 4000 CEL*

Po zavaření kořenové oblasti třemi housenkami metodou 141 byla nasazena technologie 111. Pro obloukové svařování obalenou elektrodou byl použit svařovací zdroj, taktéž od společnosti Fronius, který je na **obr. 20** vpravo. Jedná se o plně digitalizovaný invertorový svařovací zdroj Trans Pocket 4000 CEL. Pro užší část svarové mezery se použila nejprve elektroda o průměru 2,5 mm, dále se pak pokračovalo elektrodou o průměru 3,2 mm. Celkově bylo pro zhotovení jedné zkušební svarové desky potřeba položit 26 housenek, zkušebních desek bylo takto zhotoveno 5.



**Obr. 21** – Zhotovený svarový spoj



## 4.2 Tepelné zpracování zkušebních svarových spojů oceli P92

Tepelné zpracování po zhotovení zkušebních desek z oceli P92 tavby 54 380 je zcela zásadní věcí této práce, která se celkově zabývá tepelným zpracováním a jeho vlivem na mechanické vlastnosti, což platí samozřejmě i pro experimentální část diplomové práce. Z pohledu svařitelnosti oceli P92 se musí určitá pozornost zaměřit i na přehřev, který je vyžadován vždy na minimálně 200 °C. Přední výrobce přídavných materiálů pro svařování Böhler Thyssen Schweisstechnik například udává doporučenou teplotu přehřevu pro svařování této oceli 200 až 300 °C.



**Obr. 22** – Digitální teploměr OMEGA HH11

Při samotném svařování zkušebních desek byla přehřívací pec nastavena na 260 °C, reálná hodnota po vytažení z pece před počátkem svařování se pohybovala v rozmezí 240 °C až 250 °C. Teplota desek se na svařovacím stole změřila před svařováním pomocí přenosného teploměru OMEGA HH11, kterým byla kontrolována i teplota interpass v průběhu svařování. Teplota interpass byla volena tak, aby nepřekročila 300 °C a neklesala pod 200 °C. Pokud byla naměřena teplota blízká 200 °C, byly svařované desky dohřívány technologií 311 mírným plamenem tak, aby byla teplota vyhovující.

Samotné tepelné zpracování bylo aplikováno na všechny svařené zkušební desky, jednalo se tedy o 5 různých režimů tepelného zpracování pro 5 desek. Teploty žíhání byly zvoleny 730 °C a 760 °C při různých výdržích na těchto teplotách. Tepelné zpracování bylo navrženo s ohledem možného vlivu na mechanické vlastnosti a také s ohledem na použití tepelných zpracování na zkušebních deskách v předešlých letech. K pozdějšímu



vyhodnocování pak budou k dispozici výsledky ze všech možných režimů tepelného zpracování při teplotách 730 °C a 760 °C, což umožní lépe vyhodnotit vliv na mechanické vlastnosti svarových spojů oceli P92.

Po dokončení procesu svařování byly desky vloženy opět do pece, ale tentokrát za účelem aplikace dohřevu, a to při teplotě 250 °C po dobu 2,5 hodin. Dohřev je používán z důvodu umožnění difuze vodíku ze svaru, prodloužení doby ochlazování a také k odstranění vnitřního pnutí. Po uplynutí potřebné doby dohřevu byly zkušební desky vytaženy z pece a vloženy do zábalu sibalalu, kde pomalu chladly. Pec na tepelné zpracování je zobrazena na **obr. 23**.



**Obr. 23** – Pec pro tepelné zpracování

**Tab. 19** – Přehled tepelného zpracování zkušebních svarových spojů

| Označení vzorku | Předehřev [°C] | Teplota interpass [°C] | Dohřev [°C / h] | Tepelné zpracování |
|-----------------|----------------|------------------------|-----------------|--------------------|
| 730/2/2         | 250            | 200 - 300              | 250 / 2,5       | 730°C / 2 h        |
| 730/3/3         | 240            | 200 - 300              | 250 / 2,5       | 730°C / 3 h        |
| 730/6/1         | 240            | 200 - 300              | 250 / 2,5       | 730°C / 6 h        |
| 760/4/4         | 240            | 200 - 300              | 250 / 2,5       | 760°C / 4 h        |
| 760/5/6         | 245            | 200 - 300              | 250 / 2,5       | 760°C / 6 h        |

### 4.3 Nedestruktivní zkoušky svarových spojů oceli P92

Nedestruktivní zkoušky svarových spojů oceli P92 byly provedeny společností CONTROLTEST s.r.o., která je kompetentní k této činnosti. Zkoušky byly prováděny v akreditované laboratoři L1610 v Ostravě Mariánských horách. Hlavním požadavkem bylo provedení kapilární zkoušky (PT) a zkoušky radiologické (RT). Protokoly s výsledky zkoušek jednotlivých zkušebních desek jsou uvedeny v přílohách.

#### 4.3.1 Kapilární zkouška (PT)

Jedná se o nejvíce využívanou nedestruktivní zkoušku pro zjištění povrchových čili vnějších vad svarových spojů, jako jsou například trhliny, mikrotrhliny, studené spoje, neprůvary a další. Podstatou kapilárních metod je použití vhodné kapilárně aktivní kapaliny, která pronikne do necelistvostí. Přebytek této kapaliny se odstraní z povrchu zkušebních vzorků a nanese se vývojka, do které vzlíná použitá kapalina, čímž dojde ke zviditelnění případných vad.

Metodika zkoušení provedená na všech zkušebních deskách byla v souladu s normou ČSN EN ISO 3452-1 (B), která stanovuje všeobecné zásady pro zkoušení kapilární metodou. Jako zkušební prostředek byla použita sada Helling Nord test, která se skládala z penetrantu U 88, čističe U87 a vývojky U89. Doba působení penetrační kapaliny činila 10 minut. Zkoušky byly provedeny při teplotě okolí 22 °C a při intenzitě osvětlení 1050 lx. Vyhodnocení zkoušky bylo provedeno dle normy ČSN EN ISO 10675-1, která specifikuje stupně přípustnosti pro indikace necelistvostí tupých svarových spojů. Nedestruktivní kapilární zkoušky byly vystaveny vzorky s označením 730/2/2, 730/3/3, 730/6/1, 760/4/4 a 760/5/6. Výsledky kapilární zkoušky jednotlivých zkušebních desek jsou uvedeny v **tab. 20**.

**Tab. 20** – Výsledky kapilární zkoušky zkušebních desek

| Kapilární zkouška (PT) / Penetrant testing (PT) |                    |                  |
|---|--------------------|------------------|
| Označení vzorku                                 | Tepelné zpracování | Výsledky zkoušky |
| 730/2/2   | 730 °C / 2 h       | Vyhovuje         |
| 730/3/3   | 730 °C / 3 h       | Vyhovuje         |
| 730/6/1   | 730 °C / 6 h       | Vyhovuje         |
| 760/4/4   | 760 °C / 4 h       | Vyhovuje         |
| 760/5/6   | 760 °C / 6 h       | Vyhovuje         |

### 4.3.2 Zkouška prozářením (RT)

Tato metoda slouží jako jedna z mála k identifikaci vnitřních objemových vad, jako jsou bubliny, vměstky, póry, vnitřní trhliny a další. Zkouška prozářením je jedna z nejstarších zkoušek nedestruktivních metod kontroly svarových spojů a řadí se mezi hojně využívané metody ke zjištění vnitřních vad ve svarových spojkách. Metodika zkoušení prováděna na zkušebních deskách oceli P92 byla v souladu s normou ČSN EN ISO 17636-1, která specifikuje základní techniky radiografie. Jako zdroj pro zkoušku prozářením byla použita RTG lampa ERESKO 42 MF, v. č. 981637-38 s nastavenými parametry proudu na 4,5 mA a napětím 160 kV. Dále byla použita měrka 10 FE EN – č. š. 01488. Použitým filmem byl C4 – Agfa D5 VAC s rozměry 10 x 40 cm. Způsob zpracování filmů byl automatický. V **tab. 21** jsou uvedeny výsledky zkoušky prozářením svařených zkušebních desek.

**Tab. 21** – *Výsledky zkoušky prozářením zkušebních desek*

| Zkouška prozářením (RT) / Radiographic testing (RT) |                    |                        |                  |
|---|--------------------|------------------------|------------------|
| Označení vzorku                                     | Tepelné zpracování | Výsledek               | Výsledky zkoušky |
| 730/2/2   | 730 °C / 2 h       | Pórovitost             | Vyhovuje         |
| 730/3/3   | 730 °C / 3 h       | Pórovitost             | Vyhovuje         |
| 730/6/1   | 730 °C / 6 h       | Pórovitost             | Vyhovuje         |
| 760/4/4   | 760 °C / 4 h       | Pórovitost             | Vyhovuje         |
| 760/5/6   | 760 °C / 6 h       | Pórovitost, shluk pórů | Vyhovuje         |

Vyhodnocení zkoušky bylo provedeno dle normy ČSN EN ISO 10675-1, která specifikuje stupně přípustnosti pro indikace necelistvostí tupých svarových spojů zjištěných radiografickým zkoušením. Přestože se nacházely ve svarových spojkách vady, jako jsou póry a shluk pórů, byly svarové spoje všech pěti zkušebních desek oceli P92 vyhodnoceny jako vyhovující.

#### 4.4 Destruktivní zkoušky svarových spojů oceli P92

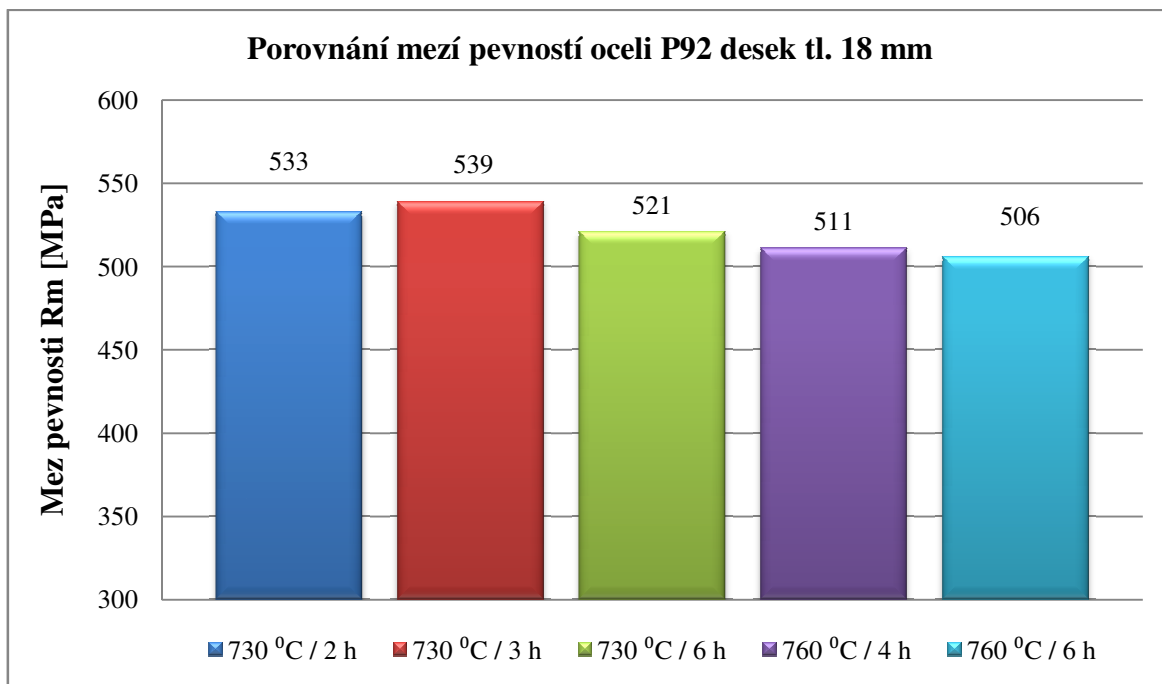
Destruktivní metody zkoušení pro zkušební svarové spoje oceli P92 byly provedeny akreditovanou společností VÍTKOVICE TESTING CENTER s.r.o. v Ostravě. Byly zvoleny tahové zkoušky, zkoušky tvrdosti a zkoušky rázem v ohybu, všechny tyto destruktivní zkoušky byly voleny s ohledem na získání potřebných hodnot o mechanických vlastnostech zkoušených tupých svařovaných spojů a pro následné vyhodnocení jejich vlivu na tepelné zpracování. Všechny získané výsledky z mechanického zkoušení jsou uvedeny níže v přehledných tabulkách a následně vyobrazeny v grafech.

##### 4.4.1 Příčná zkouška tahem

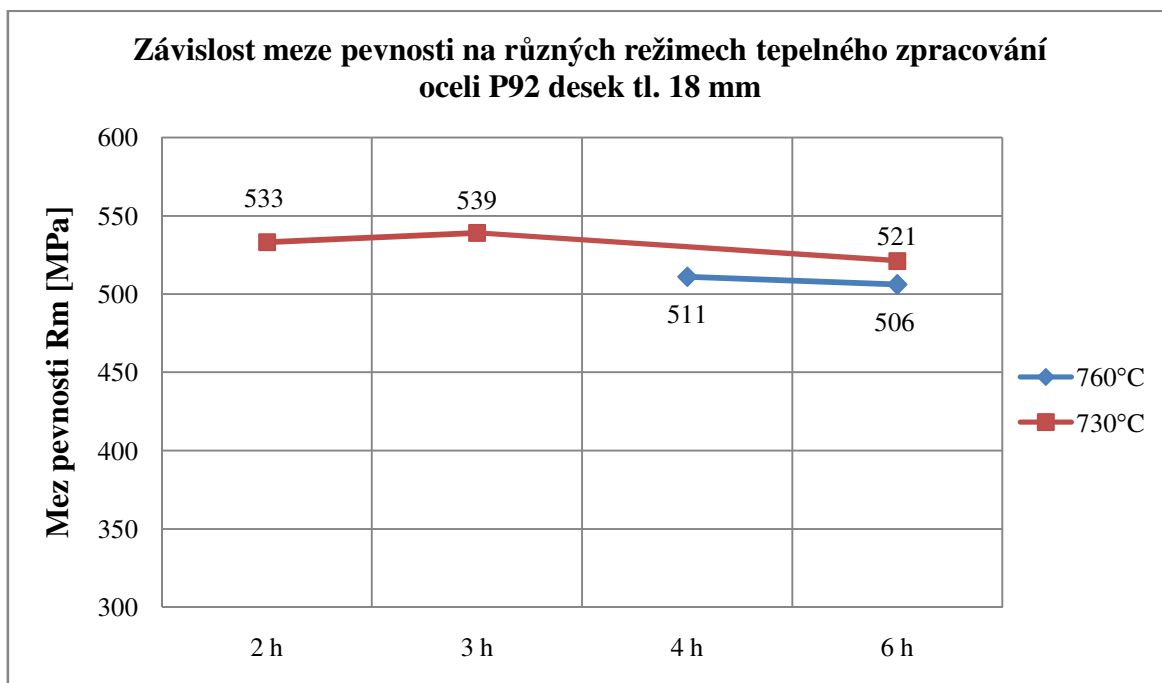
Destruktivní metoda příčná zkouška tahem byla provedena v souladu s normou ČSN EN ISO 4136, která stanovuje rozměry zkušebních vzorků a postup provádění příčných tahových zkoušek. Z této zkoušky bude jako výstupní hodnota zjištěná mez pevnosti v tahu a místo lomu tupého svarového spoje. Z každé svařené desky byly odebrány dvě zkušební tyče, které byly následně podrobeny zkoušením. Hodnoty mezí pevnosti v tahu z příčné zkoušky tahem jsou uvedeny v **tab. 22** a graficky znázorněny v **grafu 1**.

**Tab. 22** – Výsledky příčné zkoušky tahem oceli P92

| Označení vzorku | Tepelné zpracování | Maximální zatížení [kN] | Průřez vzorku [mm <sup>2</sup> ] | R <sub>m</sub> [MPa] | Průměrná hodnota R <sub>m</sub> [MPa] | Místo lomu |
|-----------------|--------------------|-------------------------|----------------------------------|----------------------|---------------------------------------|------------|
| 730/2/2         | 730 °C / 2 h       | 243                     | 451,8                            | 538                  | 533                                   | Mimo svar  |
|                 |                    | 238                     | 451,8                            | 527                  |                                       |            |
| 730/3/3         | 730 °C / 3 h       | 248                     | 456,1                            | 544                  | 539                                   | Mimo svar  |
|                 |                    | 241                     | 451,8                            | 533                  |                                       |            |
| 730/6/1         | 730 °C / 6 h       | 236                     | 456,1                            | 517                  | 521                                   | Mimo svar  |
|                 |                    | 238                     | 454,3                            | 524                  |                                       |            |
| 760/4/4         | 760 °C / 4 h       | 233                     | 451,8                            | 516                  | 511                                   | Mimo svar  |
|                 |                    | 228                     | 451,8                            | 505                  |                                       |            |
| 760/5/6         | 760 °C / 6 h       | 228                     | 451,8                            | 505                  | 506                                   | Mimo svar  |
|                 |                    | 229                     | 451,8                            | 507                  |                                       |            |



**Graf 1** – Srovnání výsledků mezí pevnosti pro různá tepelná zpracování



**Graf 2** – Závislost meze pevnosti na tepelném zpracování

### Vyhodnocení příčné zkoušky tahem

Hodnoty meze pevnosti v tahu oceli P92 při teplotě 20 °C stanovené dle normy ČSN EN ISO 10216 – 2 se pohybují v rozmezí 620 až 850 MPa. Výsledky z příčné zkoušky tahem svařených zkušebních desek ukazují hodnoty, které zdaleka nedosahují spodní hranice meze pevnosti uváděné normou ČSN EN ISO 10216 – 2. Z tohoto důvodu lze posuzovat tyto výsledky za nevyhovující. Zjištěné meze pevnosti v tahu se pohybují v rozmezí 506 až 539 MPa, což jsou markantně nízké hodnoty. Trend závislosti na tepelném zpracování ukazuje, že maximální hodnoty bylo dosaženo při tepelném zpracování 730 °C / 3 h a při delší době výdrže pak mez pevnosti klesá. Nejnižší mez pevnosti byla zjištěna u desky tepelně zpracované režimem 760 °C / 6 h. Celkově se však hodnoty meze pevnosti v tahu mění o malé hodnoty. Není zcela jasné, z jakého důvodu byly výsledkem tak markantně nízké hodnoty. Aspekty, kterými můžeme naznačit, zda jsou výsledky meze pevnosti věrohodné, mohou být naměřené hodnoty tvrdosti, podle kterých lze zhruba odvodit i možnou pevnost. V případě naměřených nízkých hodnot tvrdosti HV10 by bylo možné částečně souhlasit s i tak nízkými výsledky meze pevnosti v tahu zapříčiněné nejspíše nevhodným tepelným zpracováním vstupního materiálu pro svaření zkušebních desek. Konečným potvrzením může být i kontrola mikrostruktury, podle které je možné odhadnout tvrdost i pevnost.

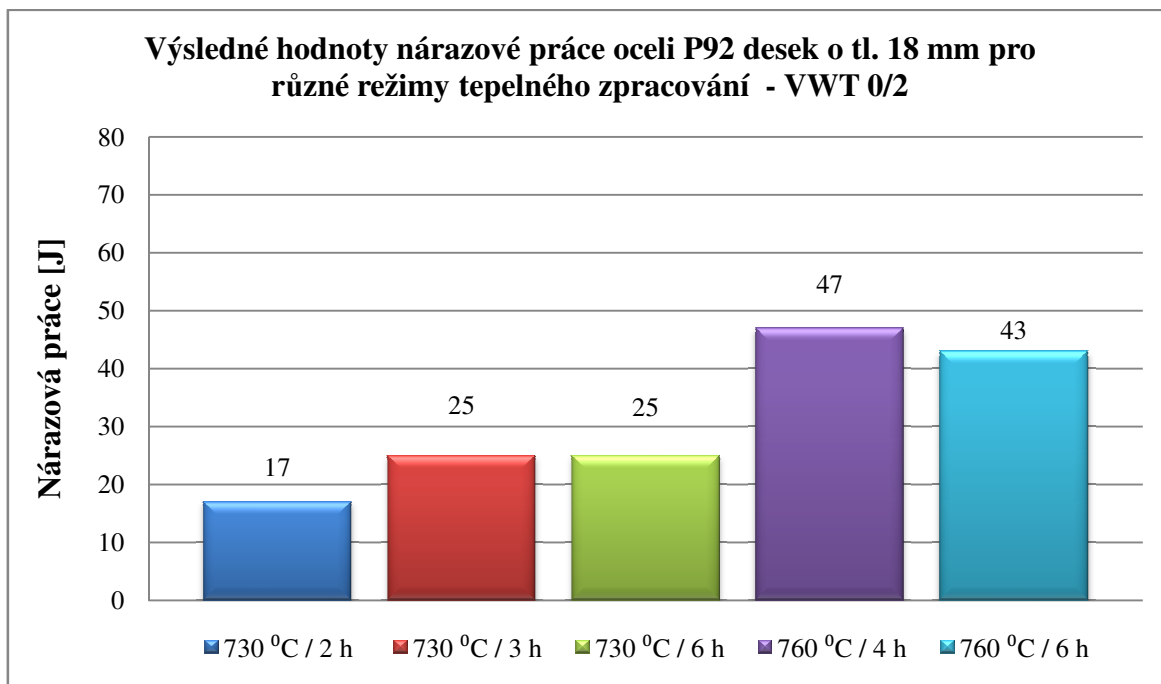
#### 4.4.2 Zkouška rázem v ohybu

Zkouška rázem v ohybu byla provedena při teplotě 20 °C v souladu s normou ČSN ISO 148 - 1, která popisuje tuto zkoušku spočívající v přeražení zkušebního tělesa s vrubem jedním rázem kyvadlového kladiva v daných podmínkách. Vrub, který je ve zkušebním tělese vytvořen, má předem dané rozměry. Další norma ČSN EN ISO 9016 pak doplňuje tuto normu o metody popisující umístění zkušebních tyčí, orientaci jejich vrubu pro zkoušku a záznam výsledků zkoušek rázem v ohybu tupých svarových spojů do protokolu. Z každé svařené zkušební desky oceli P92 byly odebrány vzorky o rozměrech 10 x 10 mm s V vrubem 2 mm ze dvou oblastí svarového spoje. Z každé oblasti byly odebrány 3 zkušební tyče, tudíž bylo vyrobeno 6 zkušebních tyčí z jedné svařené zkušební desky. První oblast, ze které se zkušební tyče odebíraly, byla oblast svarového kovu VWT 0/2 (vysvětlení značky: V - Charpy V vrub; W - Vrub ve svarovém kovu, referenční linie je v ose svaru; T - Vrub je kolmý k povrchu svarového spoje; 0/ - vrub je v ose svaru; /2 - vrub 2 mm pod povrchem svaru). Druhá oblast odběru

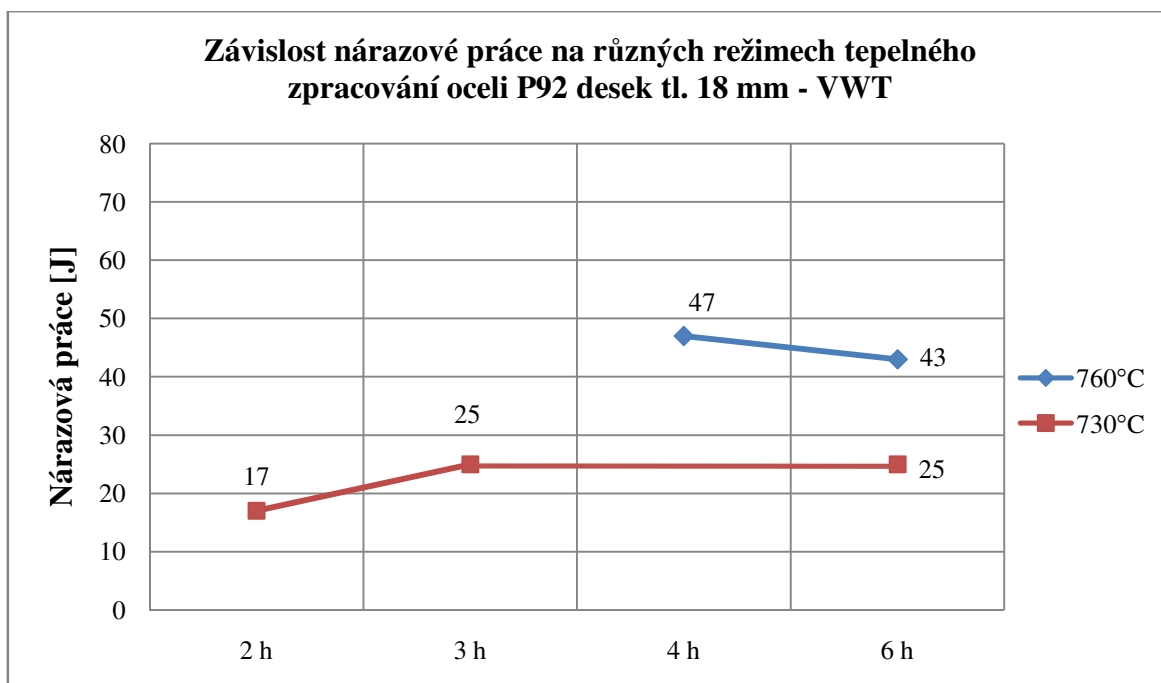
zkušebních tyčí byla tepelně ovlivněná oblast VHT 2/2(vysvětlení značky: V - Charpy V vrub; H - Vrub v TOO, referenční linií je linie natavení; T - vrub je kolmý k povrchu svarového spoje; 2/ - vrub je 2 mm od linie natavení; /2 - vrub je 2 mm pod povrchem v TOO). Výsledky z destruktivní zkoušky rázem v ohybu jsou uvedeny v **tab. 23** a následně vyobrazeny v **grafu 3** pro svarový kov a v **grafu 5** pro tepelně ovlivněnou oblast. Kompletní protokol o zkoušce je přiložen v přílohách.

**Tab. 23** – Výsledky ze zkoušky rázem v ohybu oceli P92

| Označení vzorku | Tepelné zpracování | Místo odběru ze svarového spoje | KV <sub>2</sub> [J] | Průměrná hodnota KV <sub>2</sub> [J] |
|-----------------|--------------------|---------------------------------|---------------------|--------------------------------------|
| 730/2/2         | 730 °C / 2 h       | VWT 0/2                         | 19                  | 17                                   |
|                 |                    |                                 | 15                  |                                      |
|                 |                    |                                 | 17                  |                                      |
|                 |                    | VHT 2/2                         | 110                 | 68                                   |
|                 |                    |                                 | 70                  |                                      |
|                 |                    |                                 | 23                  |                                      |
| 730/3/3         | 730 °C / 3 h       | VWT 0/2                         | 11                  | 25                                   |
|                 |                    |                                 | 29                  |                                      |
|                 |                    |                                 | 34                  |                                      |
|                 |                    | VHT 2/2                         | 11                  | 11                                   |
|                 |                    |                                 | 16                  |                                      |
|                 |                    |                                 | 7                   |                                      |
| 730/6/1         | 730 °C / 6 h       | VWT 0/2                         | 18                  | 25                                   |
|                 |                    |                                 | 23                  |                                      |
|                 |                    |                                 | 34                  |                                      |
|                 |                    | VHT 2/2                         | 14                  | 12                                   |
|                 |                    |                                 | 11                  |                                      |
|                 |                    |                                 | 12                  |                                      |
| 760/4/4         | 760 °C / 4 h       | VWT 0/2                         | 48                  | 47                                   |
|                 |                    |                                 | 39                  |                                      |
|                 |                    |                                 | 54                  |                                      |
|                 |                    | VHT 2/2                         | 46                  | 41                                   |
|                 |                    |                                 | 47                  |                                      |
|                 |                    |                                 | 29                  |                                      |
| 760/5/6         | 760 °C / 6 h       | VWT 0/2                         | 27                  | 43                                   |
|                 |                    |                                 | 46                  |                                      |
|                 |                    |                                 | 57                  |                                      |
|                 |                    | VHT 2/2                         | 45                  | 72                                   |
|                 |                    |                                 | 75                  |                                      |
|                 |                    |                                 | 96                  |                                      |

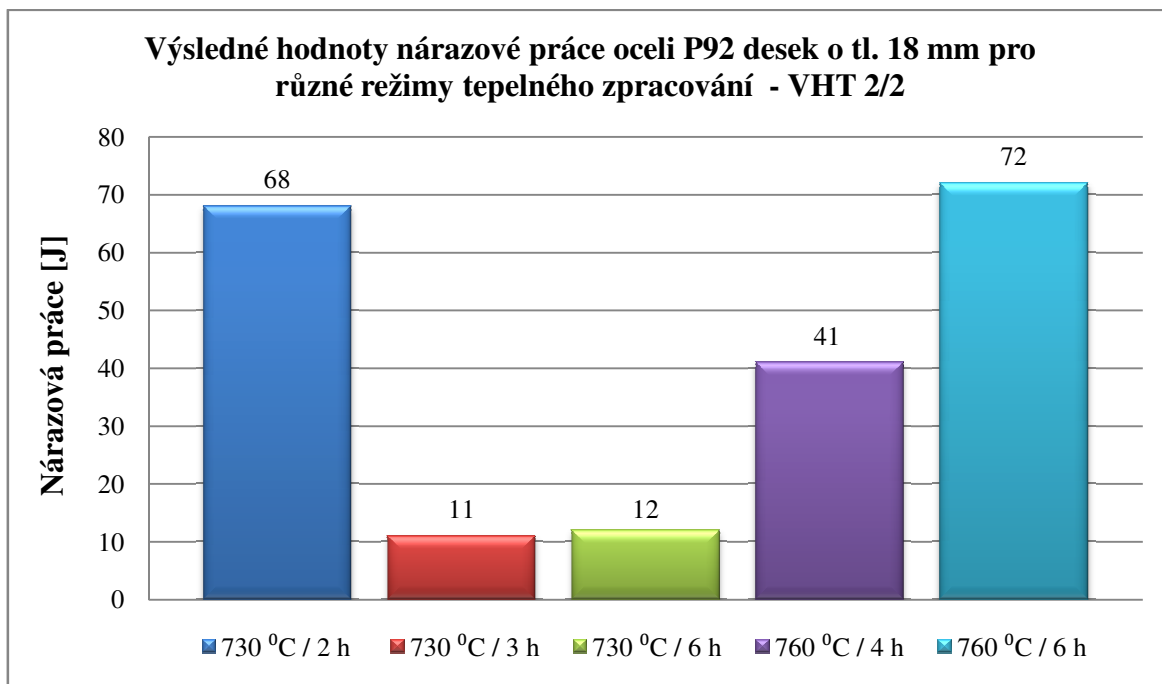


**Graf. 3 – Srovnání výsledků nárazové práce pro různá tepelná zpracování - VWT**

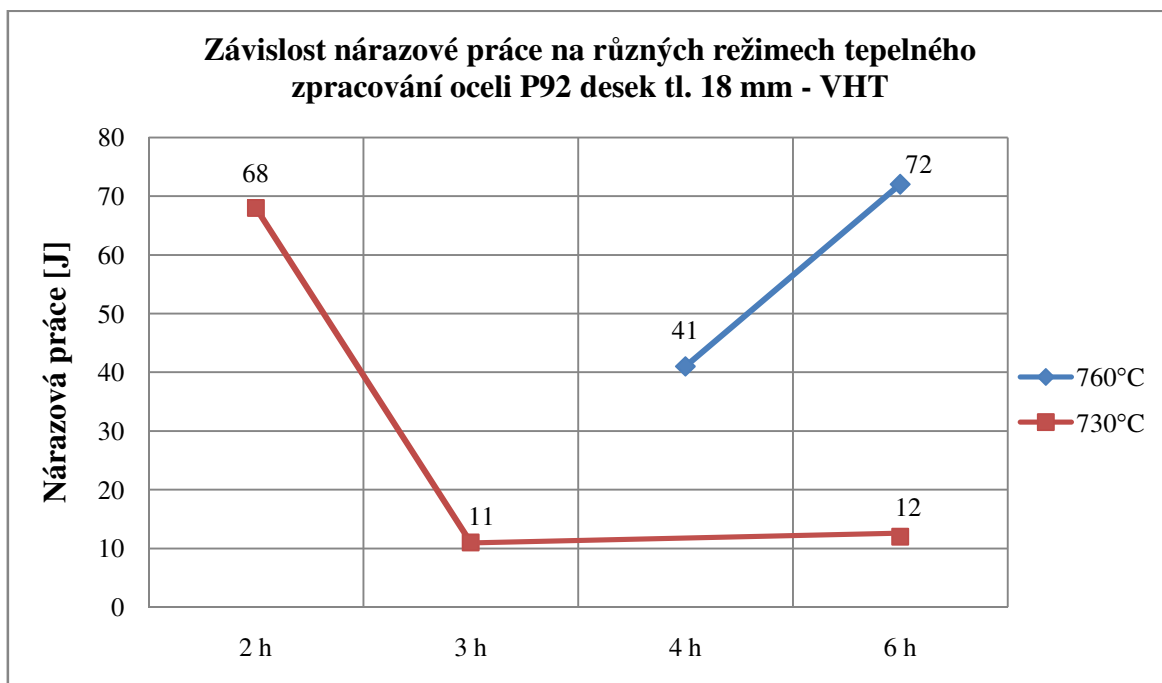


**Graf. 4 – Závislost výsledků nárazové práce na tepelném zpracování - VWT**





**Graf. 5** – Srovnání výsledků nárazové práce pro různá tepelná zpracování – VHT



**Graf. 6** – Závislost výsledků nárazové práce na tepelném zpracování - VHT

**Vyhodnocení výsledků ze zkoušky rázem v ohybu**

K vyhodnocení výsledků z této destruktivní zkoušky je třeba znát minimální hodnotu nárazové práce pro porovnatelnost. Dle normy ČSN EN 13480-2 je pro ocel P92 stanovena spodní hodnota nárazové práce 27 J. Hned v několika případech se výsledky svařených zkušebních desek dostaly pod tuto limitní hranici a to jak v oblasti svarového kovu, tak i v tepelně ovlivněné oblasti.

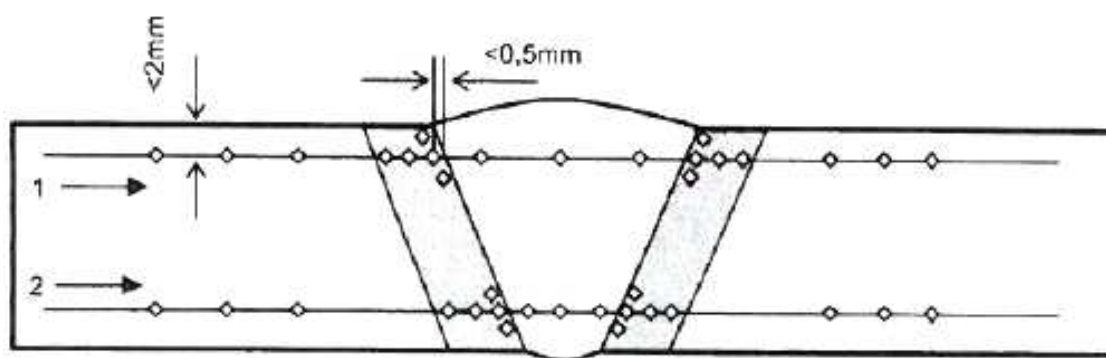
Z výsledků odebraných vzorků z oblasti VWT, tedy svarového kovu, je patrný mírný růst hodnoty nárazové práce s narůstající dobou výdrže až do hodnoty maxima 47 J při režimu 760 °C / 4 h. Při delší době výdrže na teplotě 760 °C hodnota nárazové práce mírně klesá. Pouze tyto hodnoty při tepelném zpracování 760 °C jsou nad minimální hodnotou 27 J a tím pádem vyhovující. Všechny výsledky z tepelných zpracování 730 °C / 2 h, 730 °C / 3 h, 730 °C / 6 h jsou nevyhovující. Zvláště v případě tepelného zpracování 730 °C / 6 h je výsledek nárazové práce značně neuspokojivý, pouze 25 J i při tak dlouhé době výdrže.

Hodnoty nárazové práce z druhé oblasti odběru zkušebních tyčí VHT, čili tepelně ovlivněné oblasti, jsou značně různorodé. Z těchto výsledků není zcela patrná jakákoliv závislost, jak na výši teploty, tak na době výdrže. Nevyhovující hodnoty nárazové práce v oblasti odběru z TOO byly: 11 J při tepelném zpracování 730 °C / 3h a 12 J při tepelném zpracování 730 °C / 6 h, což jsou velice nízké hodnoty. Hodnota nárazové práce při 2 hodinách výdrže na 730 °C vyšla ve výsledku jako druhá nejvyšší z porovnávané oblasti VHT. Z **grafu 6** je patrný trend u tepelného zpracování při teplotě 760 °C, kdy s delší dobou výdrže hodnota nárazové práce roste až k hodnotě maxima 72 J při tepelném zpracování 760 °C/ 6 h.

Hlavním poznost je zaměřena na hodnoty nárazové práce naměřené z oblasti svarového kovu. Očekávaný trend je takový, že hodnoty nárazové práce by měly při delších dobách výdrže růst, v tomto případě se však zcela nepotvrdil. V případě nevyhovujících hodnot je možno zvážit, zda odebrané tyče nemohly zasahovat do poslední krycí housenky, která má horší plastické vlastnosti z důvodu nevyžítání následující housenkou. Při hodnocení výsledků z oblasti VHT musí být brána v potaz ta okolnost, že při odběru zkušební tyče nelze v každém případě přesně umístit vrub na linii natavení. Z tohoto důvodu se při hodnocení nárazové práce v oblasti VHT musí počítat s jistou odchylkou.

#### 4.4.3 Zkouška tvrdosti

Destruktivní zkouška tvrdosti byla provedena podle normy ČSN EN ISO 9015 – 1, která specifikuje zkoušky tvrdosti na příčných řezech svarových spojů obloukově svařených kovových materiálů. Odpovídá zkouškám tvrdosti podle Vickerse v souladu s normou ČSN EN ISO 6507-1, s obvyklým zkušebním zatížením 49 N nebo 98 N (HV 5 nebo HV 10). V tomto případě bylo měření tvrdosti prováděno dle Vickerse HV10 při okolní teplotě 20 °C. Tato destruktivní zkouška byla prováděna za účelem stanovení nejvyšší a nejnižší hodnoty tvrdosti HV10 jak základního materiálu, tak svarového kovu i tepelně ovlivněné oblasti. Měření tvrdosti HV10 bylo prováděno ve dvou liniích, a to v podpovrchové vrstvě, která je značená číslem 1 a kořenové vrstvě, která je značená číslem 2, jak je zobrazeno na **obr. 24**. Jednotlivé vpichy v daných liniích kontrolovaly tvrdost v oblastech základního materiálu, tepelně ovlivněné oblasti a svarového kovu. Všechny získané hodnoty z měření tvrdosti jsou uvedeny v **tab. 24**. Kompletní protokoly z destruktivní zkoušky tvrdosti jsou přiloženy v přílohách.



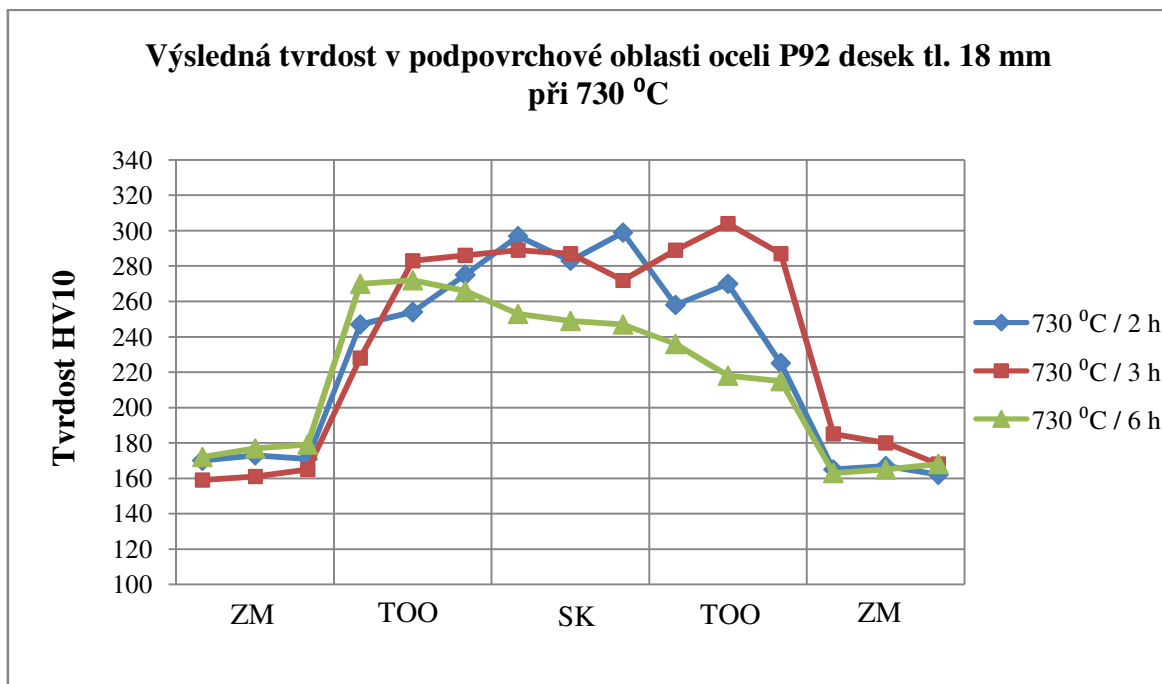
**Obr. 24** – Schéma zkoušky tvrdosti tupého spoje



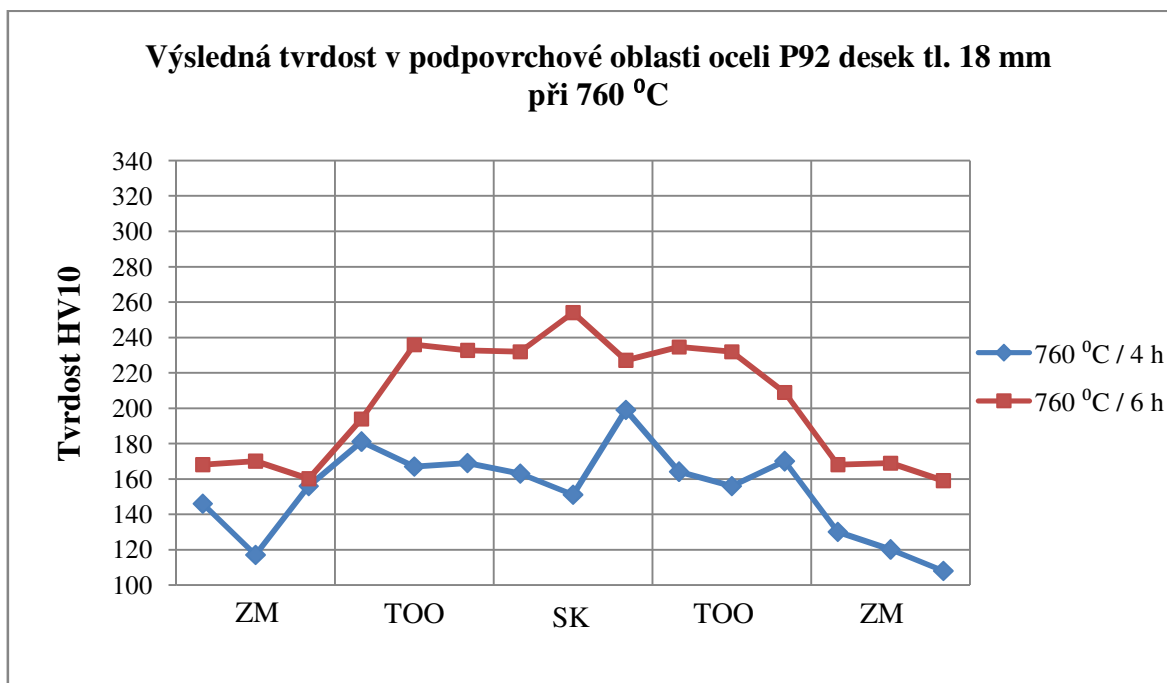
**Obr. 25** – Vpichy po měření tvrdosti na vzorku 760/4/4

Tab. 24 – Výsledky ze zkoušky tvrdosti HV10 oceli P92

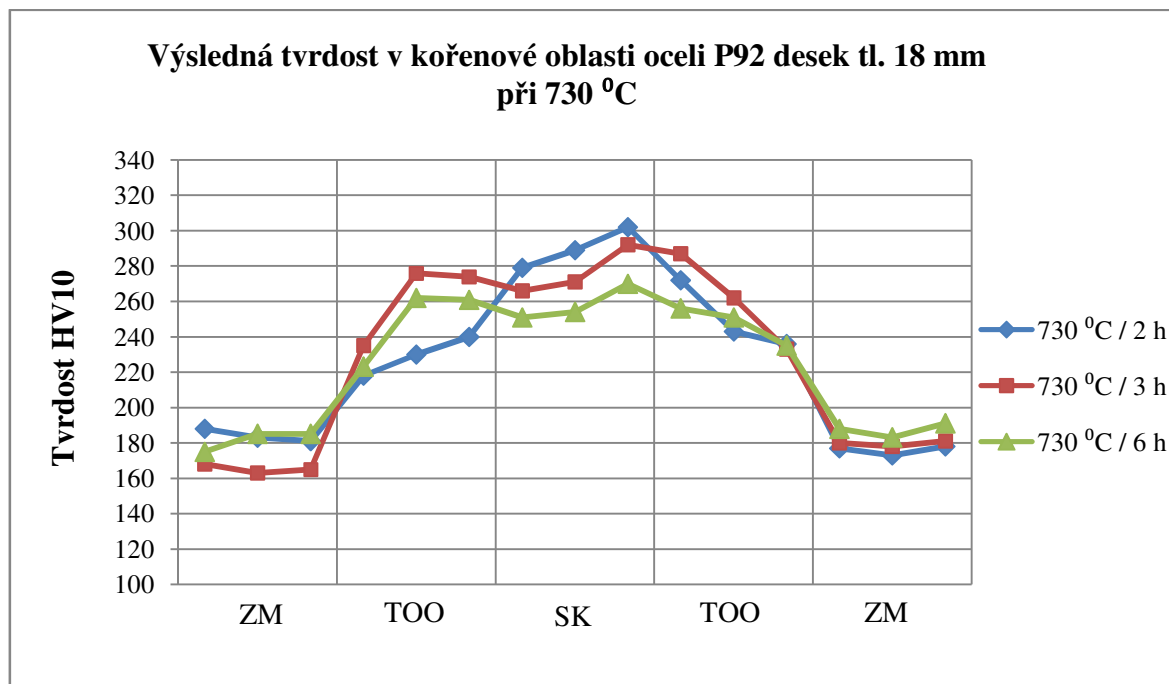
| Označení vzorku | TZ           | Oblast měření | ZM              | TOO       | SK                    | TOO             | ZM              |
|-----------------|--------------|---------------|-----------------|-----------|-----------------------|-----------------|-----------------|
| 730/2/2         | 730 °C / 2 h | 1             |                 |           | 306                   |                 |                 |
|                 |              |               | 170   173   171 | 247   254 | 276   297   283   299 | 279   270   225 | 165   167   162 |
|                 |              |               |                 |           | 243                   | 240             |                 |
|                 |              | 2             |                 |           | 243                   | 292             |                 |
|                 |              |               | 188   183   181 | 218   230 | 242   279   289   302 | 266   243   236 | 177   173   178 |
|                 |              |               |                 |           | 235                   | 258             |                 |
| 730/3/3         | 730 °C / 3 h | 1             |                 |           | 272                   | 287             |                 |
|                 |              |               | 159   161   165 | 228   283 | 297   289   287   272 | 306   304   287 | 185   180   168 |
|                 |              |               |                 |           | 289                   | 274             |                 |
|                 |              | 2             |                 |           | 274                   | 292             |                 |
|                 |              |               | 168   163   165 | 235   276 | 279   266   271   292 | 289   262   233 | 180   178   181 |
|                 |              |               |                 |           | 268                   | 281             |                 |
| 730/6/1         | 730 °C / 6 h | 1             |                 |           | 270                   | 254             |                 |
|                 |              |               | 172   177   179 | 270   272 | 274   253   249   247 | 233   218   215 | 163   165   168 |
|                 |              |               |                 |           | 254                   | 221             |                 |
|                 |              | 2             |                 |           | 272                   | 260             |                 |
|                 |              |               | 175   185   185 | 223   262 | 260   251   254   270 | 258   251   235 | 188   183   191 |
|                 |              |               |                 |           | 251                   | 251             |                 |
| 760/4/4         | 760 °C / 4 h | 1             |                 |           | 168                   | 161             |                 |
|                 |              |               | 146   117   156 | 181   167 | 169   163   151   199 | 167   156   170 | 130   120   108 |
|                 |              |               |                 |           | 170                   | 165             |                 |
|                 |              | 2             |                 |           | 124                   | 158             |                 |
|                 |              |               | 102   101   107 | 124   140 | 140   136   146   131 | 145   140   118 | 108   103   116 |
|                 |              |               |                 |           | 141                   | 140             |                 |
| 760/5/6         | 760 °C / 6 h | 1             |                 |           | 230                   | 228             |                 |
|                 |              |               | 168   170   160 | 194   236 | 247   232   254   227 | 249   232   209 | 168   169   159 |
|                 |              |               |                 |           | 221                   | 227             |                 |
|                 |              | 2             |                 |           | 201                   | 236             |                 |
|                 |              |               | 159   157   154 | 183   201 | 192   212   228   236 | 233   236   228 | 157   173   164 |
|                 |              |               |                 |           | 170                   | 218             |                 |



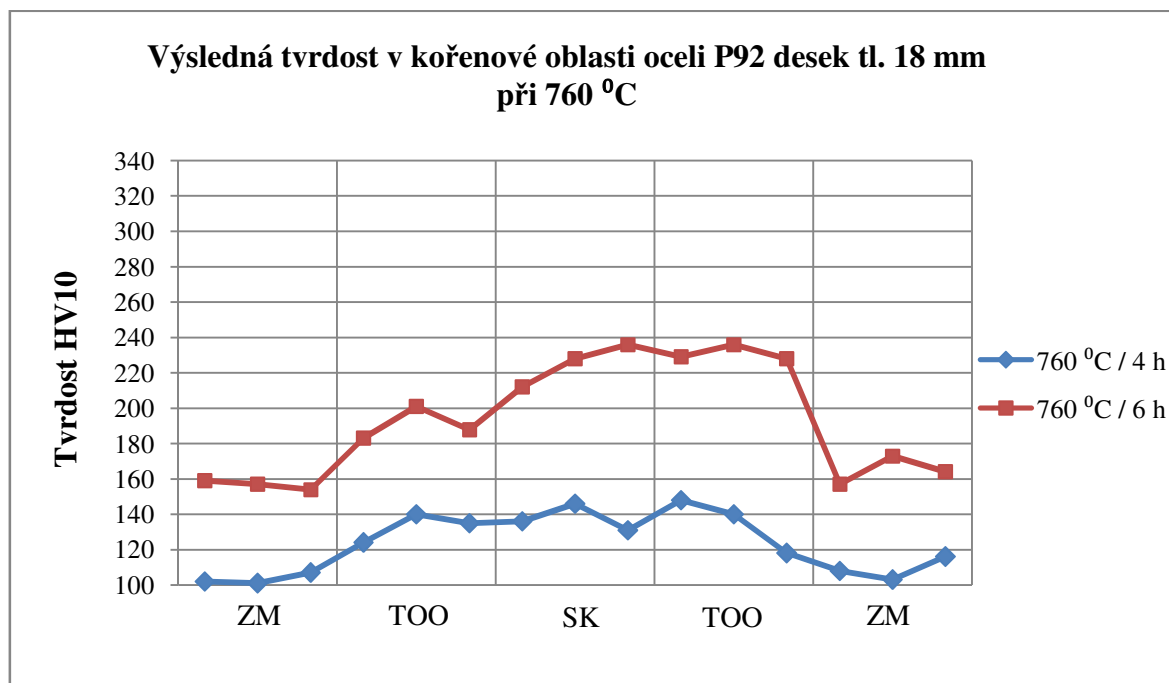
**Graf 7** – Výsledná tvrdost v podpovrchové oblasti při teplotě zpracování 730 °C



**Graf 8** – Výsledná tvrdost v podpovrchové oblasti při teplotě zpracování 760 °C



**Graf 9** – Výsledná tvrdost v kořenové oblasti při teplotě zpracování 730 °C



**Graf 10** – Výsledná tvrdost v kořenové oblasti při teplotě zpracování 760 °C

## Vyhodnocení zkoušky tvrdosti

Získané hodnoty tvrdosti zkušebních desek oceli P92 byly porovnány s normou ČSN EN ISO 15614-1, která stanovuje dovolenou maximální hodnotu tvrdosti svarového spoje martenzitické oceli na 350 HV po tepelném zpracování. Nejvyšší tvrdosti byly podle očekávání zjištěny u desek tepelně zpracovaných režimy 730° C / 2 h, 730° C / 3 h. Při tepelném zpracování 730° C / 3 h byla naměřena vůbec nejvyšší hodnota 304 HV10, a to v podpovrchové linii v tepelně ovlivněné oblasti. Druhá nejvyšší hodnota byla 302 HV10 při tepelném zpracování 730° C / 3 h v kořenové linii oblasti svarového kovu. Tato deska však měla průměrně nejvyšší tvrdost jak v podpovrchové, tak i v kořenové linii ze všech svařených zkušebních desek. Nejnižší hodnoty tvrdosti ve všech oblastech byly naměřeny na zkušební desce, která byla tepelně zpracovaná režimem 760° C / 4 h, kdy nejvyšší hodnota tvrdosti této desky byla 199 HV10 naměřená v podpovrchové linii svarového kovu, což je příliš nízká hodnota pro tento typ oceli.

Z výsledků všech zkušebních desek je patrné, že limitní hodnoty 350 HV10 nebylo dosaženo. Nejvyšší tvrdosti bylo dosaženo zpravidla v podpovrchové linii svarového kovu, v některých případech i v tepelně ovlivněné oblasti. Obecně lze říci, že vyšších hodnot tvrdosti je dosahováno v podpovrchové linii, jelikož se jedná o krycí housenku, která již není vyžíhaná následující housenkou. Byl však objeven jiný problém a to ten, že v některých případech byly naměřeny v oblasti základního materiálu příliš nízké hodnoty. Hodnoty se pohybují kolem 160 HV10 a v některých případech tepelného zpracování dokonce i kolem 110 HV10. To může poukazovat na fakt, že dodaný materiál z oceli P92 pro svaření zkušebních desek byl nevhodně tepelně zpracován, než dle daných požadavků. Tvrdost v kořenové linii svarového kovu sice byla dostatečně vysoká, to však může být důsledek toho, že v této oblasti dochází k minimálnímu mísení přídavného materiálu se základním materiálem, tím pádem je ve svarovém kovu hlavní poměr roztaveného přídavného materiálu.

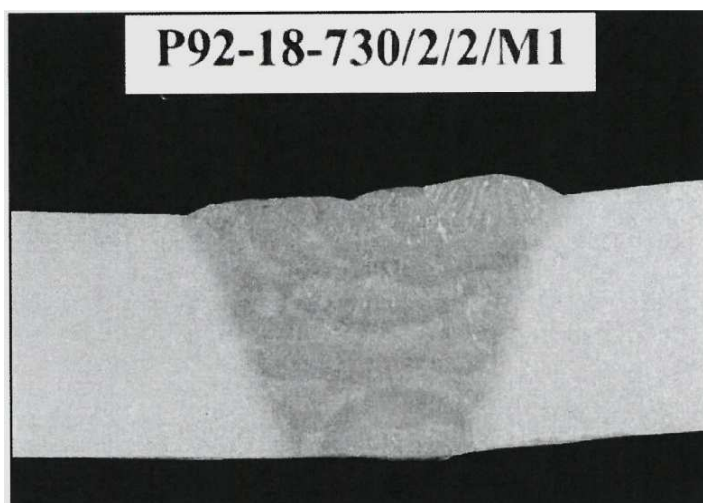
Potvrzení nebo vyvrácení skutečnosti, že dodaný vstupní materiál pro svaření zkušebních desek nebyl v požadované jakosti, může přinést nahlédnutí do mikrostruktury a ověření stavu struktury svarového spoje a to do všech oblastí, zejména tedy do základního materiálu.

#### 4.5 Kontrola makrostruktury zkušebních svarových spojů

Provedená zkouška makrostruktury byla v souladu s platnou normou ČSN EN ISO 17639, která poskytuje doporučení pro přípravu vzorků, zkušební postupy a klíčové záměry při makroskopické a mikroskopické kontrole. Podstata této zkoušky je v naleptání vhodným činidlem vybroušeného povrchu zkušebního vzorku z důvodu vyvolání jeho čitelné makrostruktury. Na zkušební vzorky s označením 730/2/2, 730/3/3 a 730/6/1 bylo použito činidlo pro naleptání 15% HNO<sub>3</sub>, které bylo nanášeno potíráním na vybroušenou plochu vzorku. Na zbylé vzorky s označením 760/4/4 a 760/5/6 bylo použito činidlo s názvem Adler – Mattinga, které bylo nanášeno stejným způsobem. Dále se u každého zkušebního vzorku určila šířka tepelně ovlivněné oblasti. Posuzování a zjišťování vad bylo realizováno pomocí zkušebního zařízení VTC 20/011 a dle zkušebního postupu QI – VTC.20GEN – 0028. Výsledky a potřebné údaje z kontroly makrostruktury zkušebních vzorků jsou uvedeny v **tab. 25**. Jednotlivé snímky makrostruktury všech zkušebních vzorků s dvojnásobným zvětšením jsou zobrazeny na **obr. 26 až 30**.

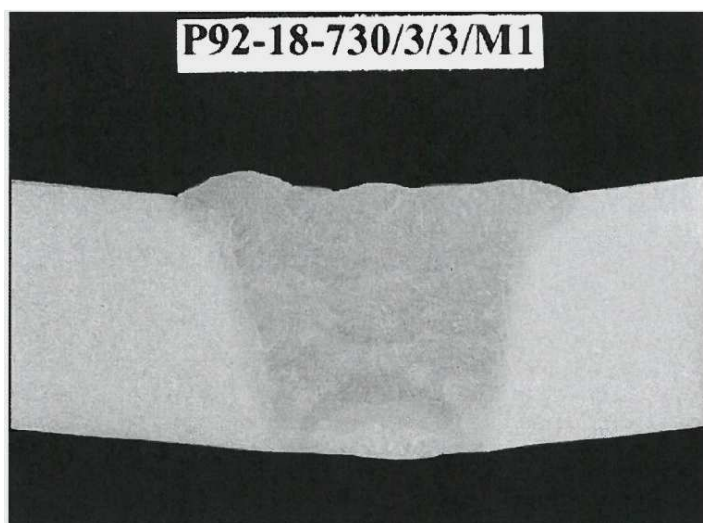
**Tab. 25** – Výsledky ze zkoušky makrostruktury

| Zkouška makrostruktury |                    |             |                         |             |
|------------------------|--------------------|-------------|-------------------------|-------------|
| Označení vzorku        | Tepelné zpracování | Šířka TOO   | Výsledek makrostruktury | Vyhodnocení |
| 730/2/2                | 730° C / 2 h       | max. 2 mm   | bez vad                 | Vyhovující  |
| 730/3/3                | 730° C / 3 h       | max. 2 mm   | bez vad                 | Vyhovující  |
| 730/6/1                | 730° C / 6 h       | max. 2 mm   | bez vad                 | Vyhovující  |
| 760/4/4                | 760° C / 4 h       | max. 2 mm   | bez vad                 | Vyhovující  |
| 760/5/6                | 760° C / 6 h       | max. 1,5 mm | bez vad                 | Vyhovující  |

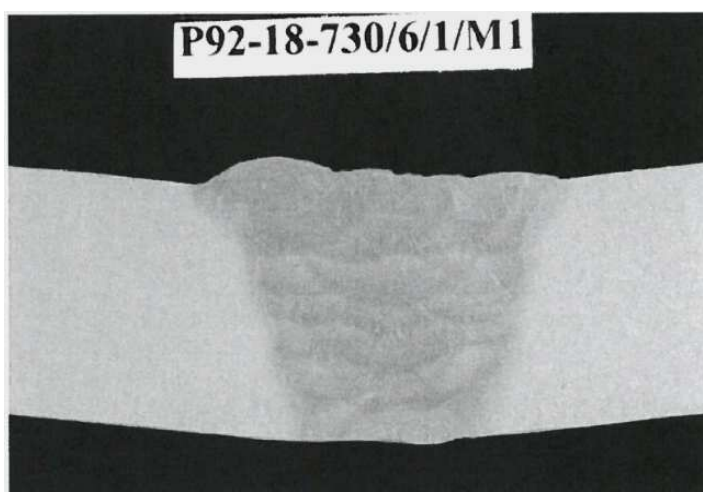


**Obr. 26** – Makrostruktura vzorku 730/2/2, zvětšení 2x





**Obr. 27** – Makrostruktura vzorku 730/3/3, zvětšení 2x



**Obr. 28** – Makrostruktura vzorku 730/6/1, zvětšení 2x



**Obr. 29** – Makrostruktura vzorku 760/4/4, zvětšení 2x



**Obr. 30** – Makrostruktura vzorku 760/5/6, zvětšení 2x

### Vyhodnocení makrostruktury

Makrostruktura všech zkušebních vzorků byla vyhodnocena jako vyhovující, nebyly nalezeny žádné viditelné póry či vměstky. Maximální šířka tepelně ovlivněné oblasti byla stanovena u všech vzorků a činila max. 2 mm, v jednom případě max. 1,5 mm.

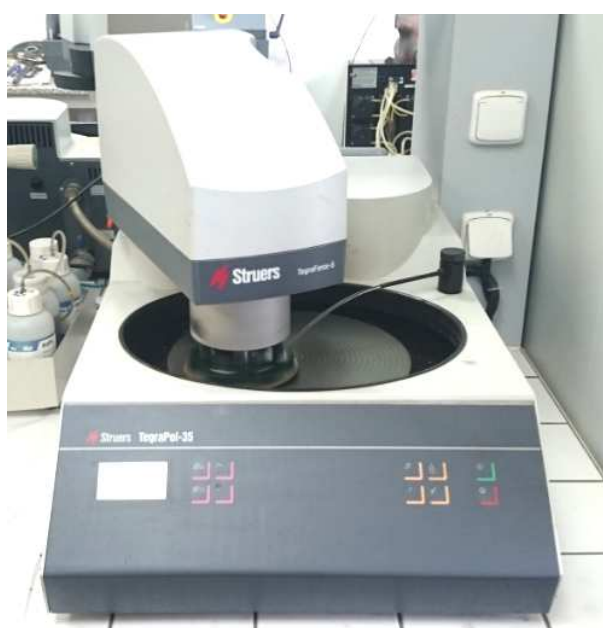
### 4.6 Kontrola mikrostruktury zkušebních svarových spojů

Při této zkoušce byla kontrolována mikrostruktura jednotlivých oblastí svarového spoje na vhodně upravených vzorcích pomocí optického mikroskopu Neophot 21. Provádění zkoušky mikrostruktury bylo provedeno v jedné z laboratoří Katedry mechanické technologie Vysoké školy báňské Technické univerzity v Ostravě. K šetření byly vybrány vzorky zkušebních svarových spojů s označením 730/3/3, 730/6/1, 760/4/4 a 760/5/6. Tyto vzorky byly preparovány hmotou Multi Fast Green, která je určená pro preparaci za tepla. Samotná preparace do hmoty Multi Fast Green byla provedená na zařízení Struers ProntoPress - 20, který je zobrazen na **obr. 31**. Podmínky pro zalisování, které jsou na přístroji přednastaveny byly: čas – 12 minut, teplota – 150° C, zatížení – 50 kN. Zalisované zkušební vzorky byly nejprve broušeny a následně leštěny na zařízení Struers TegraPol – 35 způsobem doporučeným výrobcem (metoda D), z důvodu získání dokonale vyleštěného povrchu. Pro vyvolání byly zkušební vzorky naleptány roztokem Villela Bain, který se skládá z 2,5 ml HCl, 0,5 g kyseliny pikrové a 47,5 ml etanolu.

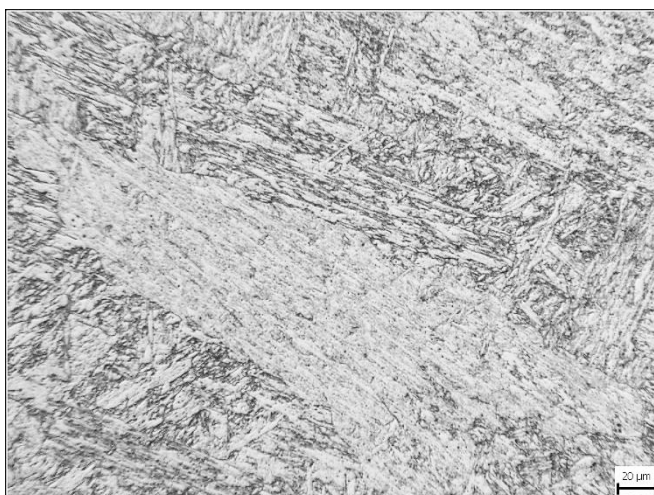


**Obr. 31** – Lisovací zařízení Struers ProntoPress - 20

Po vyvolání mikrostruktury leptadlem byly zkušební vzorky přeneseny k mikroskopu Neophot 21, kde probíhalo samotné šetření a hodnocení mikrostruktury ve všech oblastech vzorku svarového spoje oceli P92. Snímky byly pořizovány z oblastí podpovrchové a kořenové linie. Stav struktury se hodnotil vždy v blízkosti prováděné kontroly tvrdosti, z důvodu její korelace s naměřenými hodnotami tvrdosti.



**Obr. 32** – Leštící zařízení Struers TegraPol - 35

**4.6.1 Mikrostruktura vzorku 730/3/3**

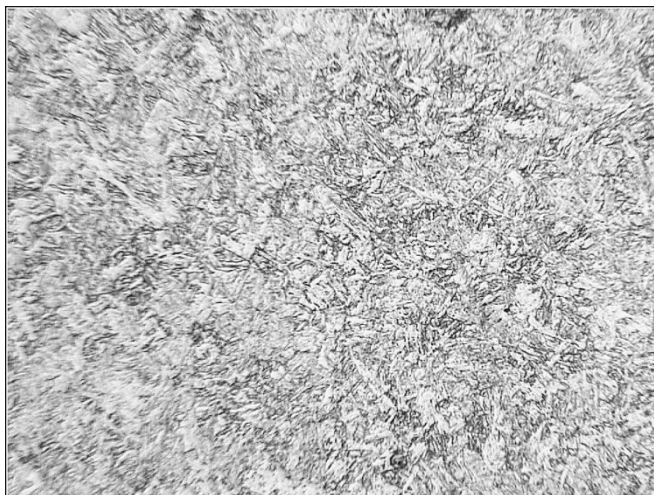
**Obr. 33** – *Krycí housenka svarového kovu, zvětšení 200x*



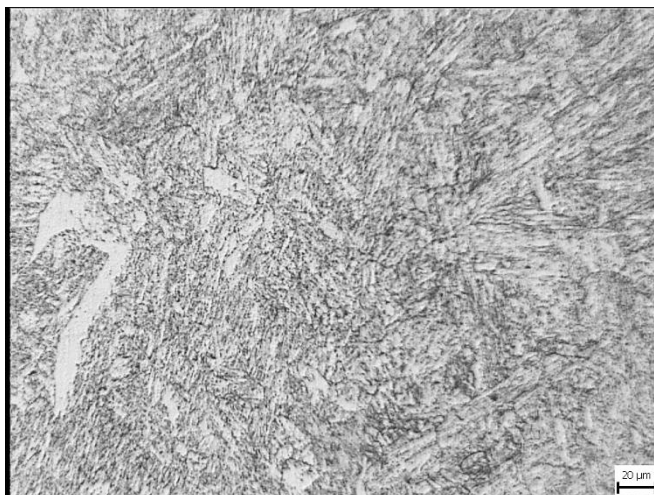
**Obr. 34** – *Tepelně ovlivněná oblast v podpovrchové linii, zvětšení 100x*



**Obr. 35** – *Základní materiál v podpovrchové linii, zvětšení 100x*



**Obr. 36** – *Vyžíhaná housenka svarového kovu v oblasti kořene, zvětšení 100x*

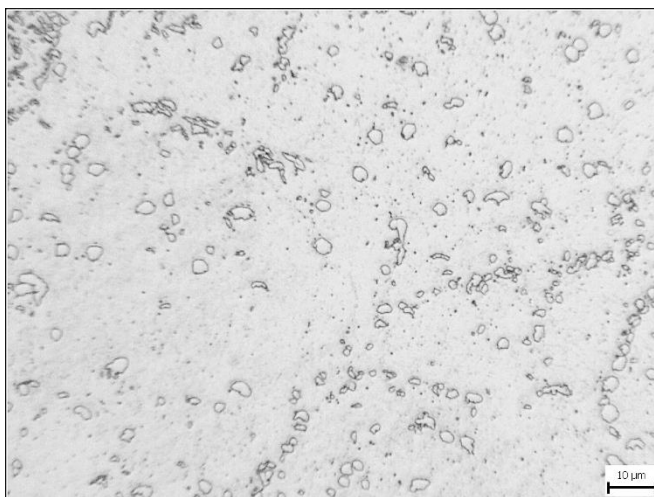


**Obr. 37** – *Tepelně ovlivněná oblast kořenové linie s  $\delta$ -feritem ve svarovém kovu, zvětšení 200x*



**Obr. 38** – *Základní materiál v kořenové linii, zvětšení 100x*





**Obr. 39** – Základní materiál v kořenové linii, zvětšení 500x

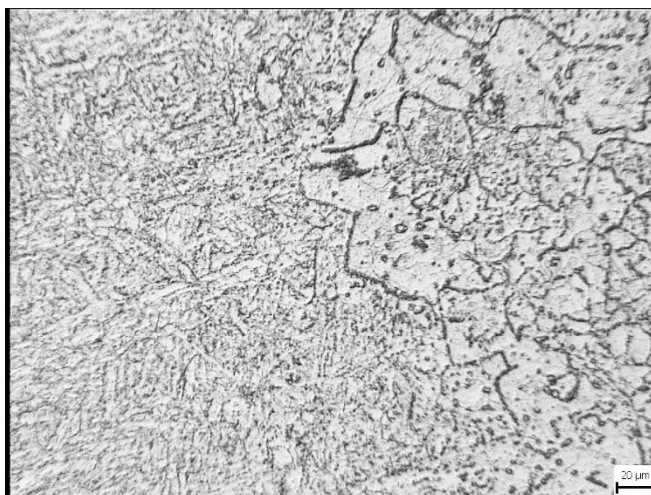
#### 4.6.2 Mikrostruktura vzorku 730/6/1



**Obr. 40** – Krycí housenka svarového kovu s  $\delta$ -feritem, zvětšení 200x



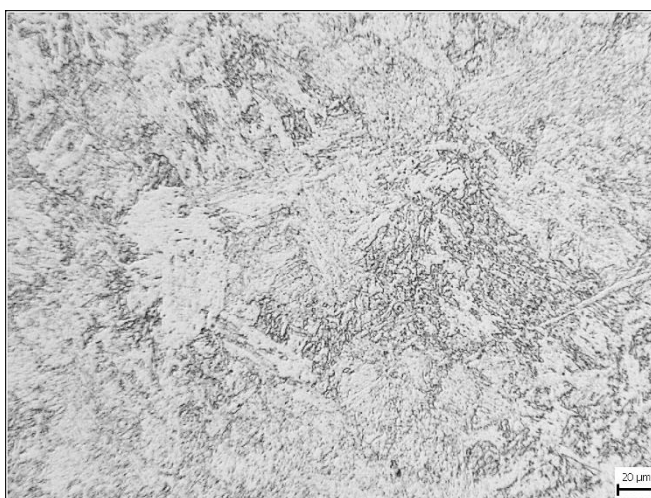
**Obr. 41** – Krycí housenka svarového kovu s  $\delta$ -feritem, zvětšení 500x



**Obr. 42** – *Tepelně ovlivněná oblast v podpovrchové linii, zvětšení 200x*



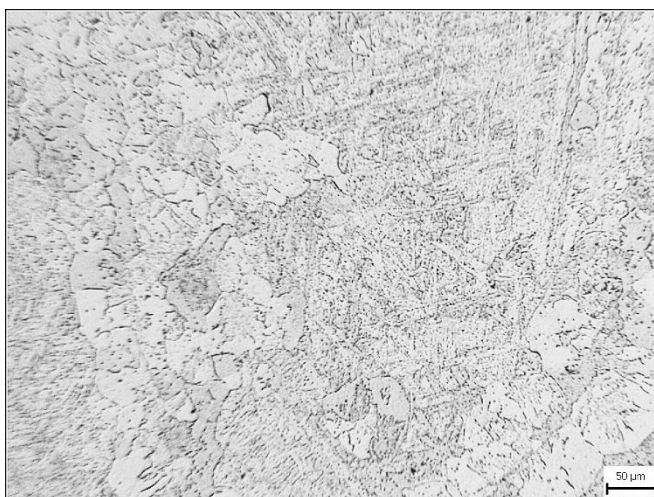
**Obr. 43** – *Základní materiál v podpovrchové linii, zvětšení 200x*



**Obr. 44** – *Oblast svarového kovu v kořenové linii, zvětšení 200x*

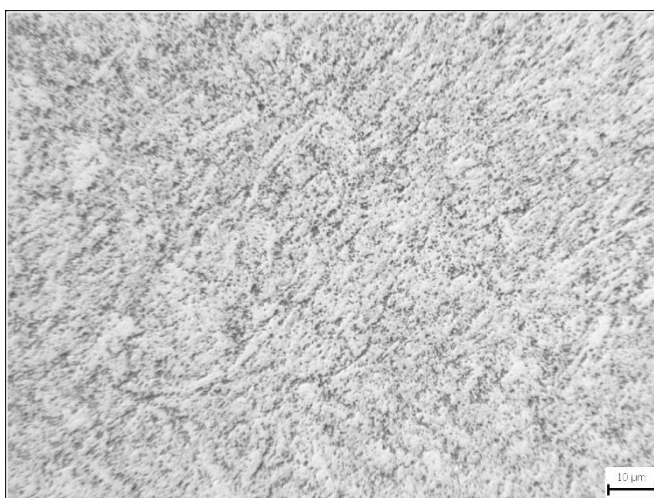


**Obr. 45** – *Tepelně ovlivněná oblast v kořenové linii, zvětšení 100x*



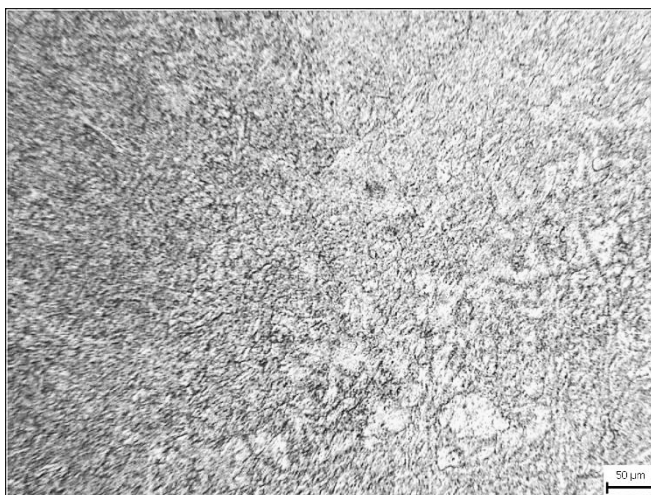
**Obr. 46** – *Základní materiál v kořenové linii, zvětšení 100x*

#### 4.6.3 Mikrostruktura vzorku 760/4/4



**Obr. 47** – *Oblast svarového kovu v podpovrchové linii, zvětšení 500x*

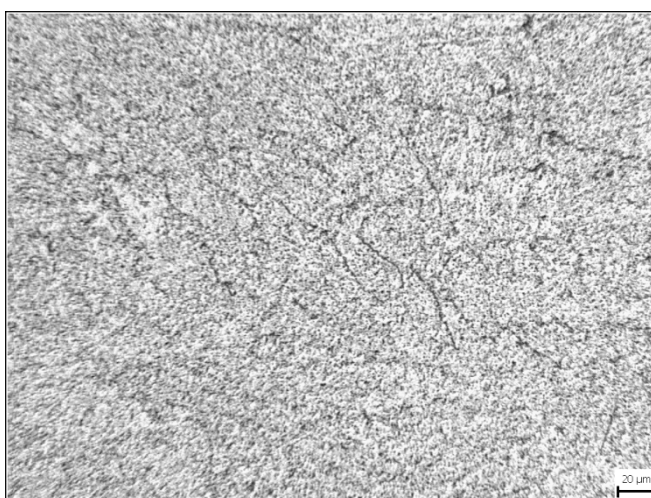




**Obr. 48** – *Tepelně ovlivněná oblast v podpovrchové linii, zvětšení 100x*



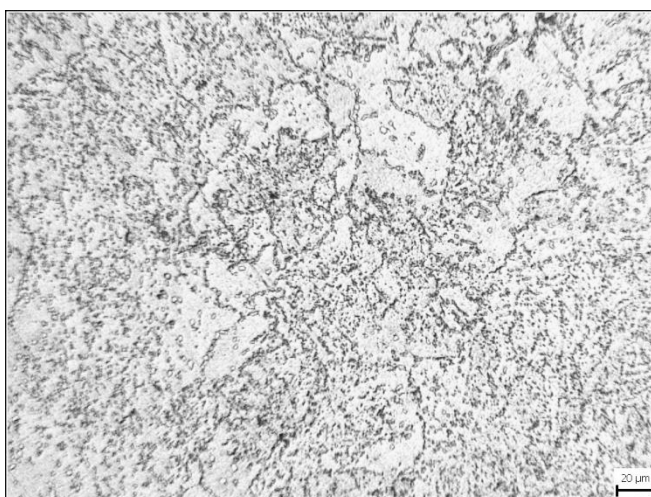
**Obr. 49** – *Základní materiál v podpovrchové linii, zvětšení 100x*



**Obr. 50** – *Oblast svarového kovu v kořenové linii, zvětšení 200x*



**Obr. 51** – *Tepelně ovlivněná oblast v kořenové linii, zvětšení 200x*

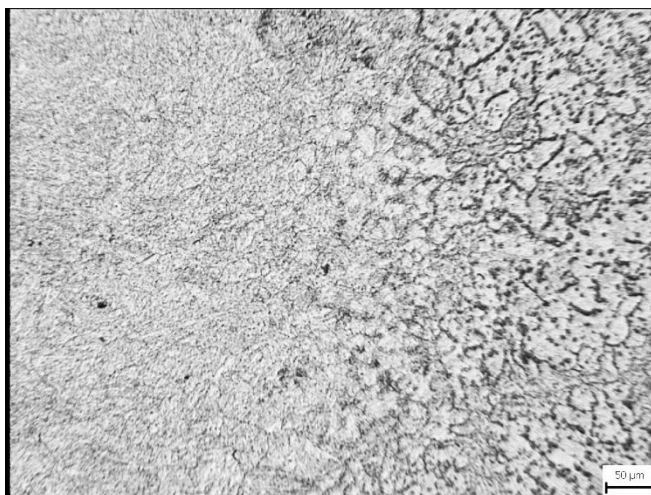


**Obr. 52** – *Základní materiál v kořenové linii, zvětšení 200x*

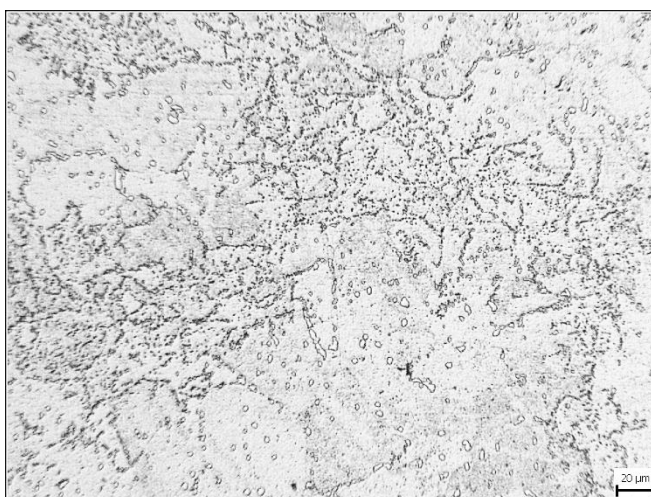
#### 4.6.4 Mikrostruktura vzorku 760/5/6



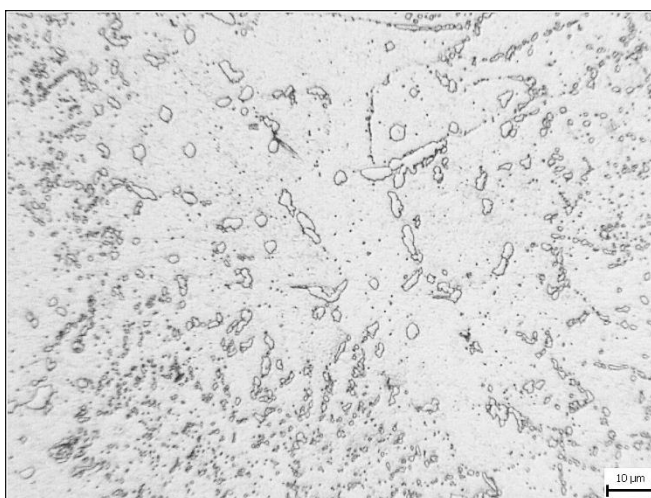
**Obr. 53** – *Oblast svarového kovu v podpovrchové linii, zvětšení 200x*



**Obr. 54** – *Tepelně ovlivněná oblast v podpovrchové linii, zvětšení 100x*



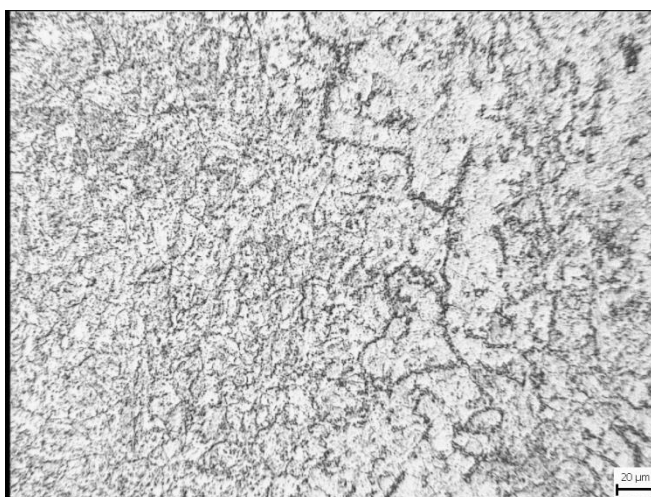
**Obr. 55** – *Základní materiál v podpovrchové linii, zvětšení 200x*



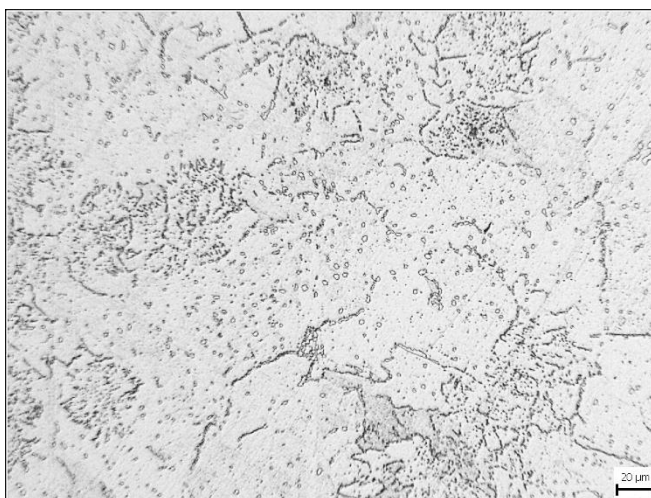
**Obr. 56** – *Základní materiál v podpovrchové linii, zvětšení 500x*



**Obr. 57** – *Oblast svarového kovu v kořenové linii, zvětšení 200x*



**Obr. 58** – *Tepelně ovlivněná oblast v kořenové linii, zvětšení 200x*



**Obr. 59** – *Základní materiál v kořenové linii, zvětšení 200x*

## Vyhodnocení mikrostruktury

Kontrola mikrostruktury vzorků 730/3/3, 730/6/1, 760/4/4 a 760/5/6 potvrdila podezření z předchozích obav, že základní materiál před svařováním zkušebních desek vykazoval již nevyhovující strukturu. Mikrostruktura základního materiálu všech zkoušených desek nevykazovala běžnou strukturu tvořenou popuštěným martenzitem, nýbrž byla tvořena zrnny feritu s četnými hrubými karbidy, velmi rozpadlým martenzitem a již vyloučenými precipitáty.

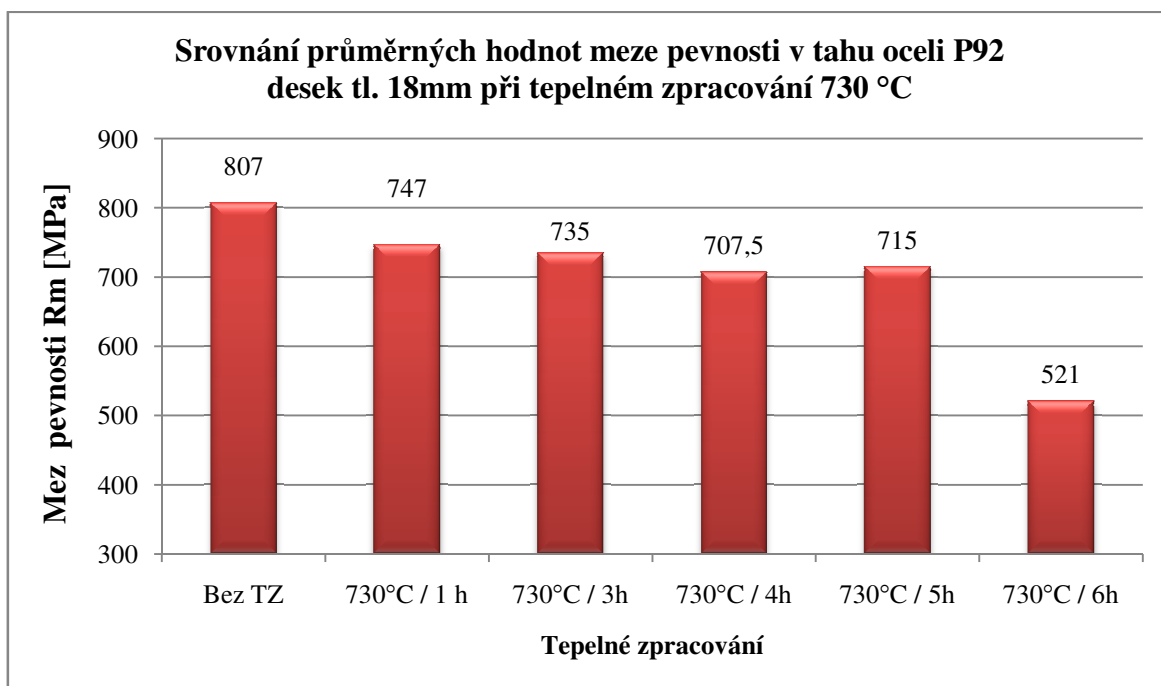
Mikrostruktura svarového kovu byla tvořena především popuštěným martenzitem, kdy v kořenové oblasti bylo možno zaznamenat zcela rozpadlou martenzitickou strukturu s karbidy po hranicích zrn, ale i uvnitř. U vzorků tepelně zpracovaných 730° C se v podpovrchové vrstvě vyskytovala především licí struktura tvořená popuštěným martenzitem. Kořenová oblast svarového kovu vzorků tepelně zpracovaných 730° C byla charakteristická vcelku rovnoměrnou, vysoce rozpadlou martenzitickou strukturou. Nejhorších strukturních charakteristik bylo dosaženo u vzorků, které byly tepelně zpracovány při 760° C, kdy svarový kov v podpovrchové i kořenové vrstvě vykazoval zcela rozpadlou martenzitickou strukturu s ojedinělým výskytem dendritického uspořádání. V krycí housence svarového kovu byl přítomný  $\delta$  – ferit, jehož výskyt mimo hranice zrn by neměl mít zásadní vliv na mechanické vlastnosti daného materiálu. Naopak pokud by byl potvrzen výskyt  $\delta$  – feritu na hranicích zrn, dochází poté k zásadnímu snížení pevnosti při tečení. V tepelně ovlivněné oblasti podpovrchové vrstvy se vyskytovaly četné precipitáty vyloučené po hranicích původních zrn a karbidy, na rozdíl od základního materiálu, kde převažovaly především hrubé vyloučené karbidy. V některých případech byly precipitáty shromážděny kolem karbidů. V kořenové vrstvě tepelně ovlivněné oblasti byl stav mikrostruktury obdobný, jako v podpovrchové vrstvě.

Výsledky mikrostruktury zkoušených svarových spojů po aplikaci různých režimů tepelného zpracování ukázaly značně nevyhovující strukturu základního materiálu tvořenou převážně zrnny feritu s výrazně zhrublými karbidy a ojedinělými zbytky rozpadlého martenzitu. Znamená to, že základní materiál před samotným svařováním byl podroben nevhodně zvolenému tepelnému zpracování. V oblasti svarového kovu byla mikrostruktura odpovídající očekávaným předpokladům daného šetření, protože daná oblast byla ovlivněna pouze podmínkami experimentu. V kořenové oblasti pak svarový kov vykazoval velmi popuštěnou až rozpadající martenzitickou strukturu z důvodu překrytí materiálu dalšími kladenými housenkami.

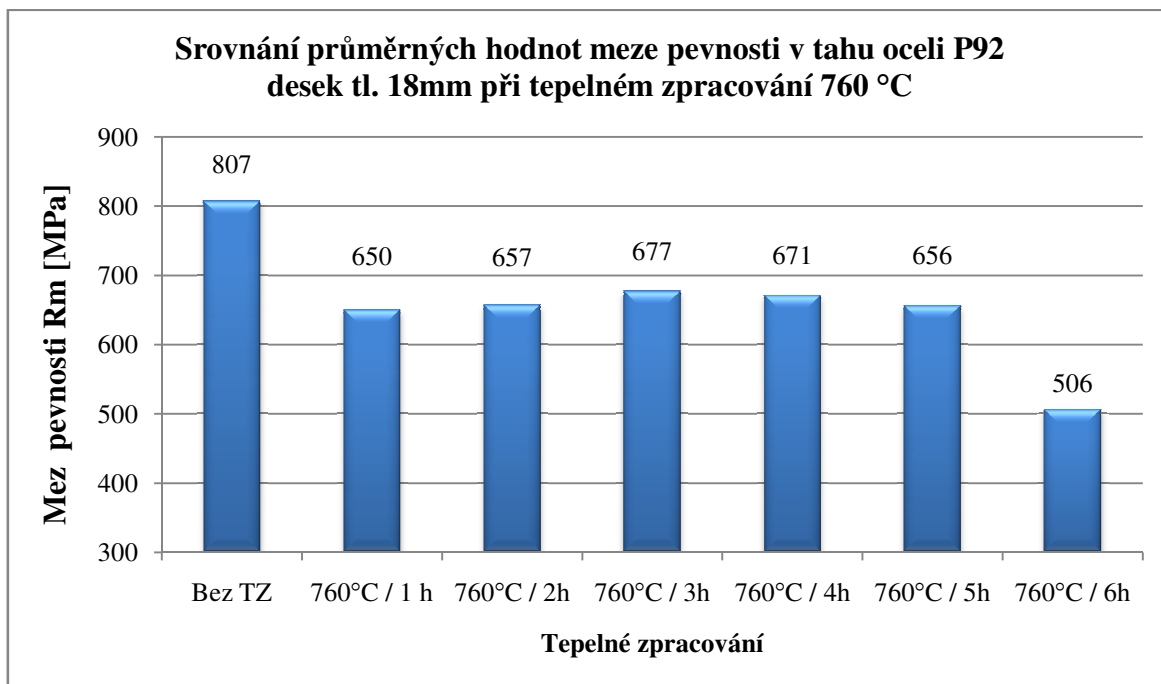
## 5 SROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ S VÝSLEDKY PŘEDEŠLÝCH EXPERIMENTŮ

V této kapitole diplomové práce je uvedeno srovnání hodnot mechanických vlastností zkušebních svarových spojů oceli P92, zhotovených z desek tloušťky 18 mm s výsledky předešlých experimentů. Z důvodu ověření současných výsledků z této diplomové práce, bylo nutno dohledat výsledky experimentů z předešlých let, které se stejnou problematikou zabývaly. Tato kapitola obsahuje grafy s již zahrnutými staršími výsledky, které pomohou objasnit, jaký z režimů tepelného zpracování je nutno aplikovat po svařování desek z oceli P92, aby hodnoty mechanických vlastností byly co nejpříznivější. Výsledky předchozích experimentů byly čerpány z literatury [32,33 a 34].

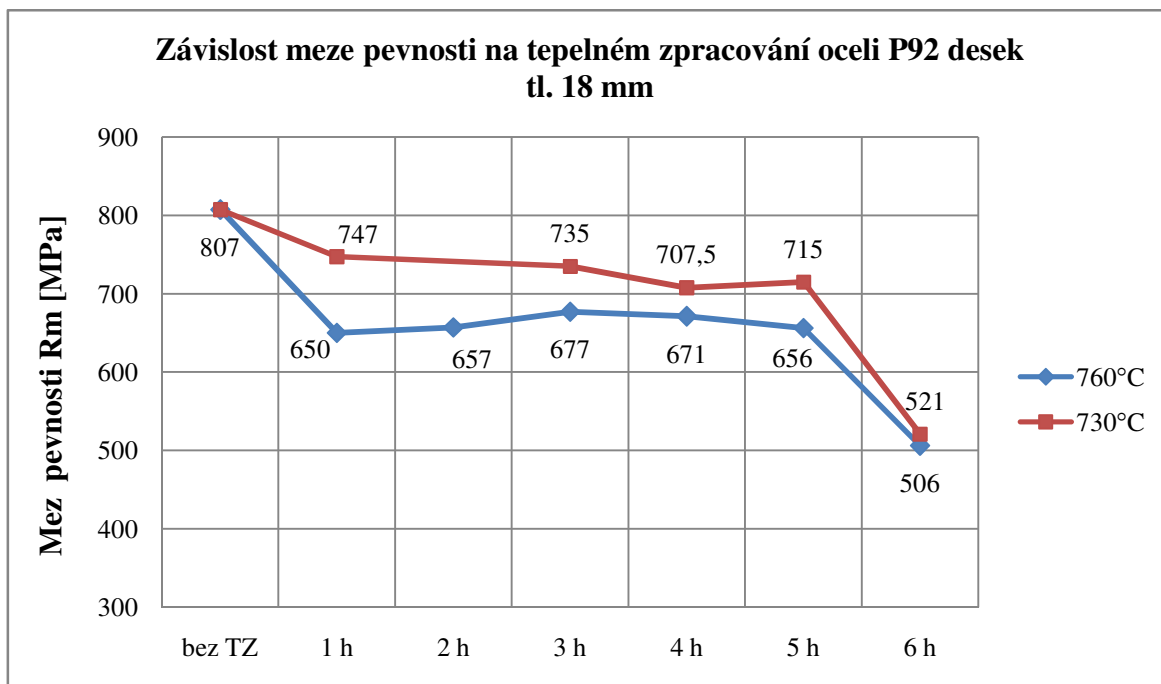
### 5.1 Srovnání výsledků z příčné zkoušky tahem



**Graf 11 – Srovnání průměrné meze pevnosti při tepelném zpracování 730 °C**



**Graf 12** – Srovnání průměrné meze pevnosti při tepelném zpracování 760 °C



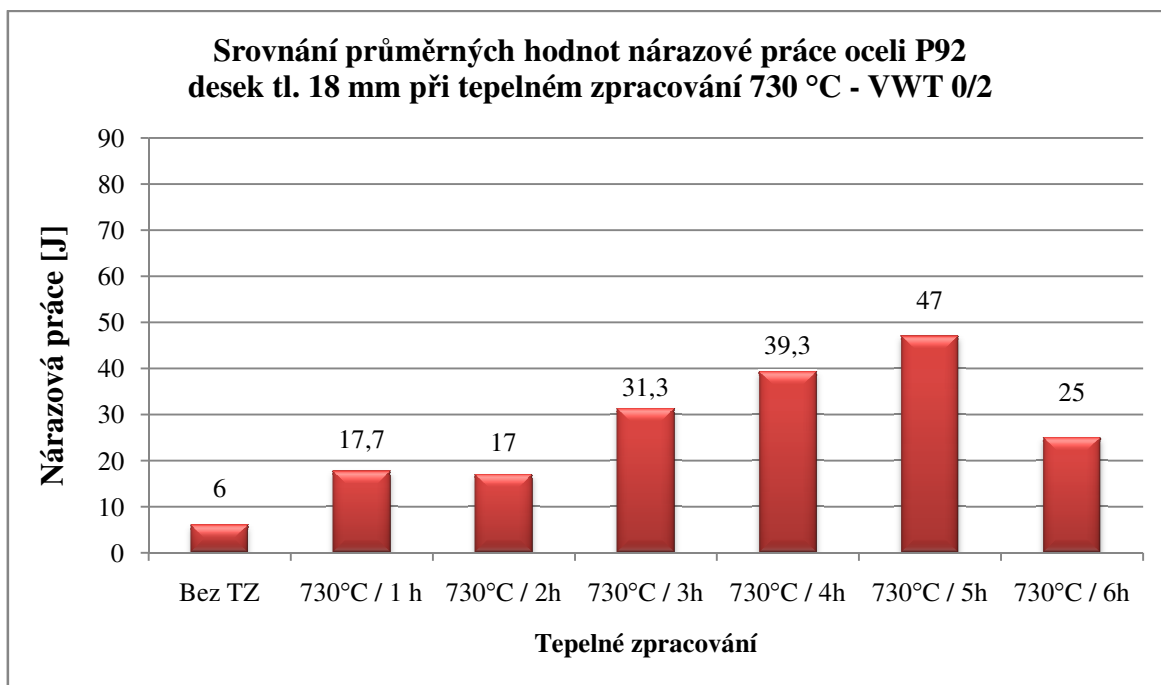
**Graf 13** – Závislost průměrné meze pevnosti na tepelném zpracování



Do výsledného srovnání grafů s hodnotami meze pevnosti s předešlými výsledky byly zařazeny hodnoty pouze zkušebních desek 730/6/1 a 760/5/6 z experimentu této diplomové práce. Zmíněné desky mohly dosáhnout tak nízkých hodnot meze pevnosti v tahu z důvodu příliš dlouhé výdrže na teplotě.

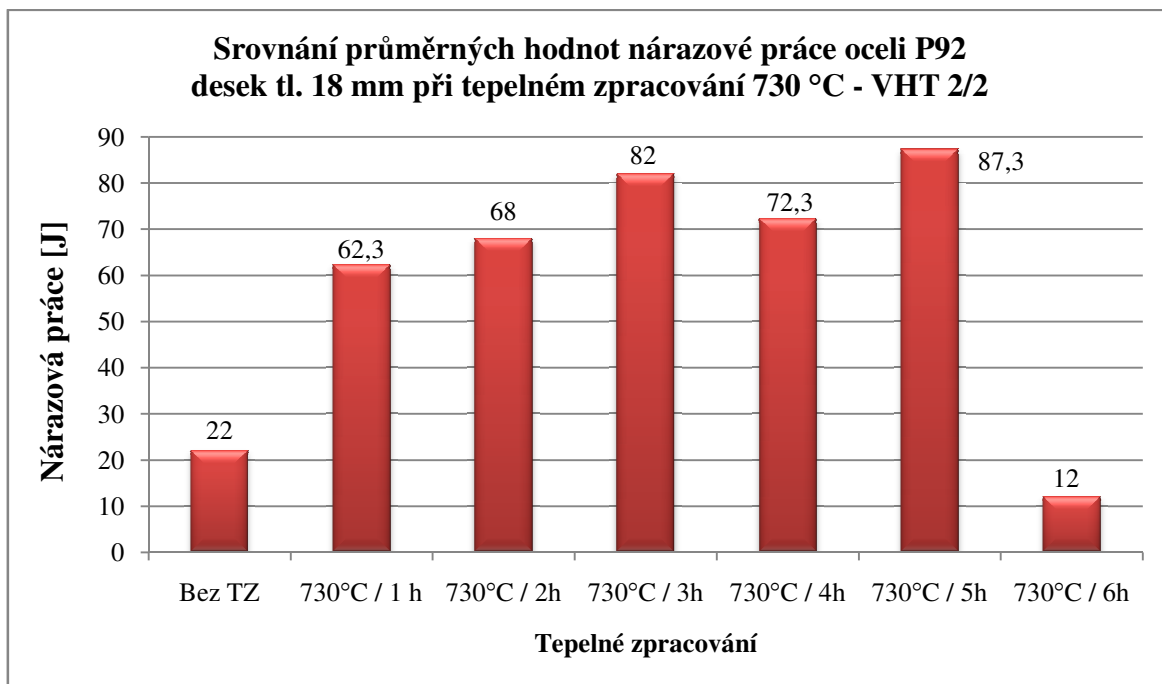
Z výše uvedených grafů pro srovnání mezí pevnosti je patrné, že vyšších hodnot dosahují režimy s teplotou 730 °C oproti teplotě 760 °C. Pro tepelné zpracování svarových spojů oceli P92 by bylo výhodné volit režimy 730 °C s čtyřhodinovou nebo pětihodinovou výdrží, kdy jsou hodnoty meze pevnosti uspokojivé, neustále se drží nad 700 MPa. Při volbě kratší doby výdrže by mohlo dojít sice k mírnému zvýšení pevnosti, ale i k poklesu křehkolomových vlastností, jako je například vrubová houževnatost. Nejvyšších hodnot meze pevnosti samozřejmě vykazují zkušební svarové spoje, které byly bez tepelného zpracování. Tato varianta je však nepoužitelná pro realizaci v praxi a to z důvodu velmi neuspokojivých křehkolomových vlastností, jak již bylo uvedeno.

## 5.2 Srovnání výsledků ze zkoušky rázem v ohybu

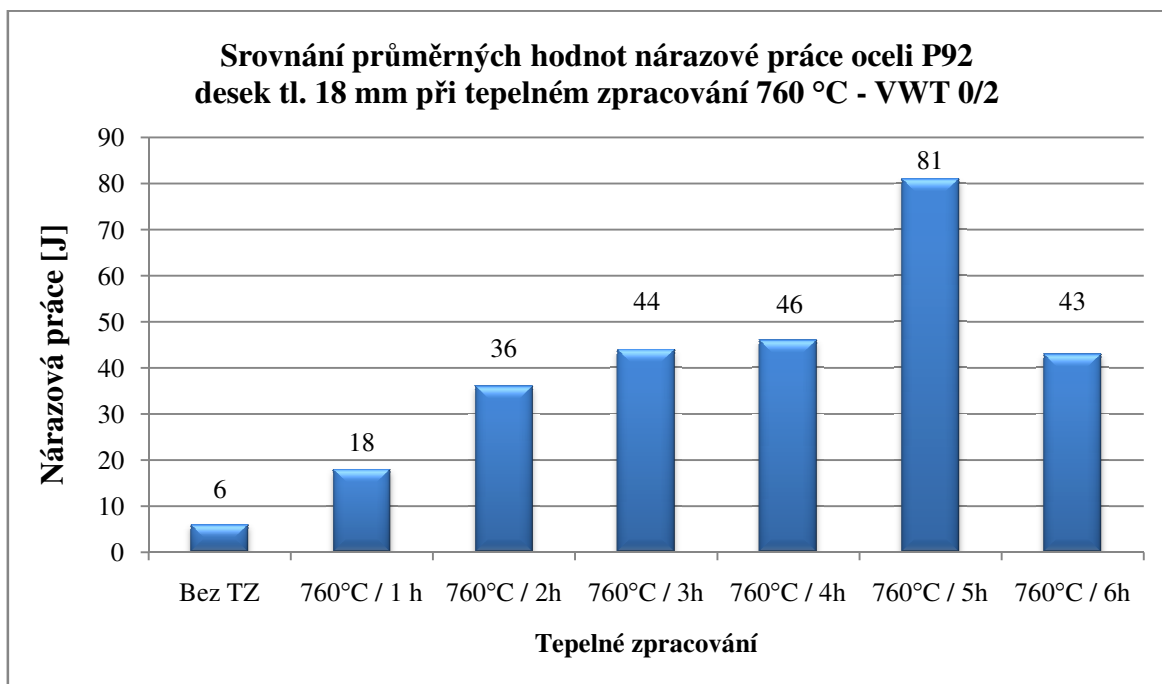


**Graf 14** – Srovnání průměrných hodnot nárazové práce při tepelném zpracování 730 °C - VWT

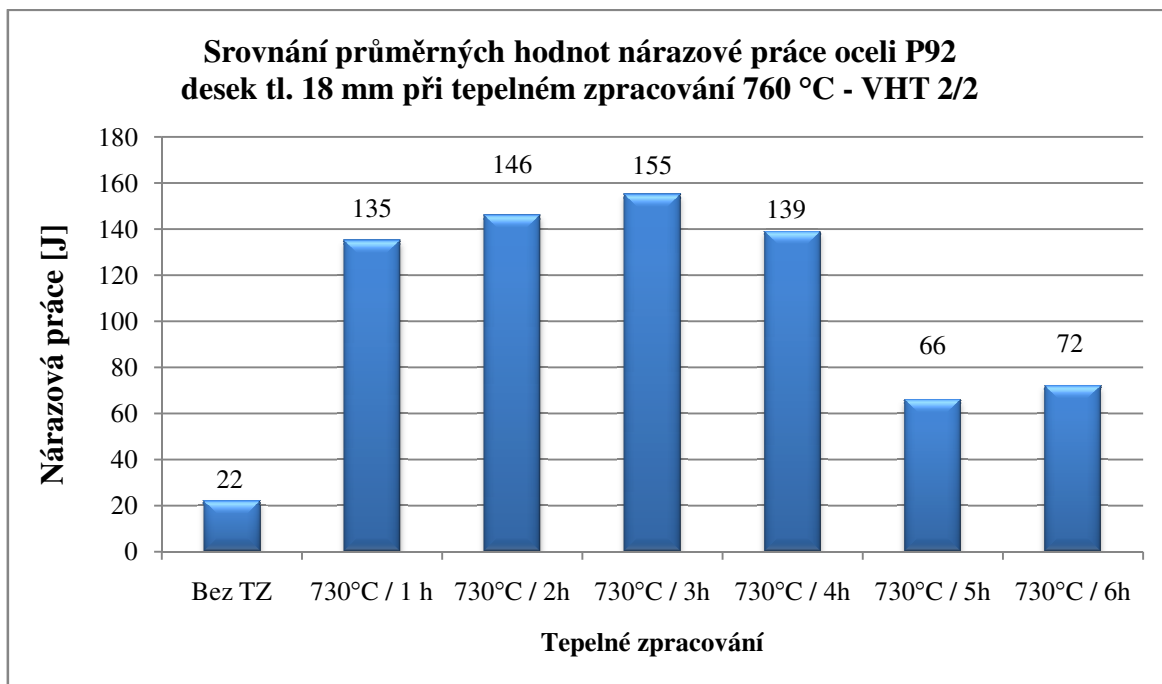




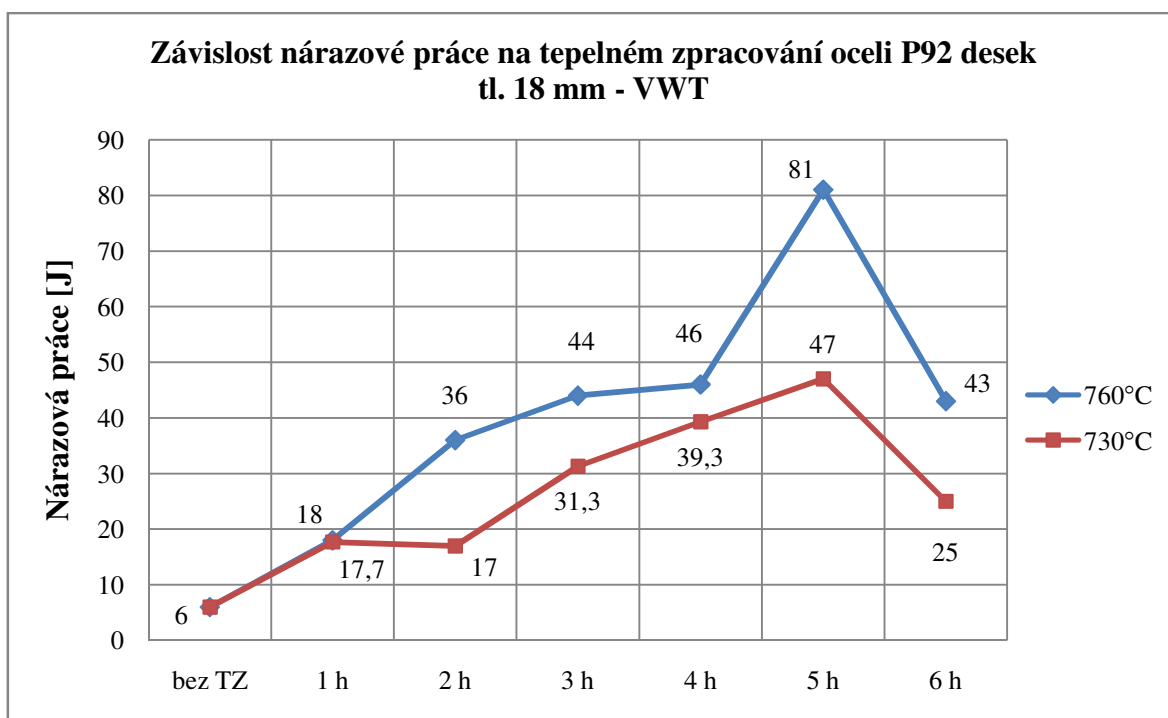
**Graf 15** – Srovnání průměrných hodnot nárazové práce při tepelném zpracování 730 °C – VHT



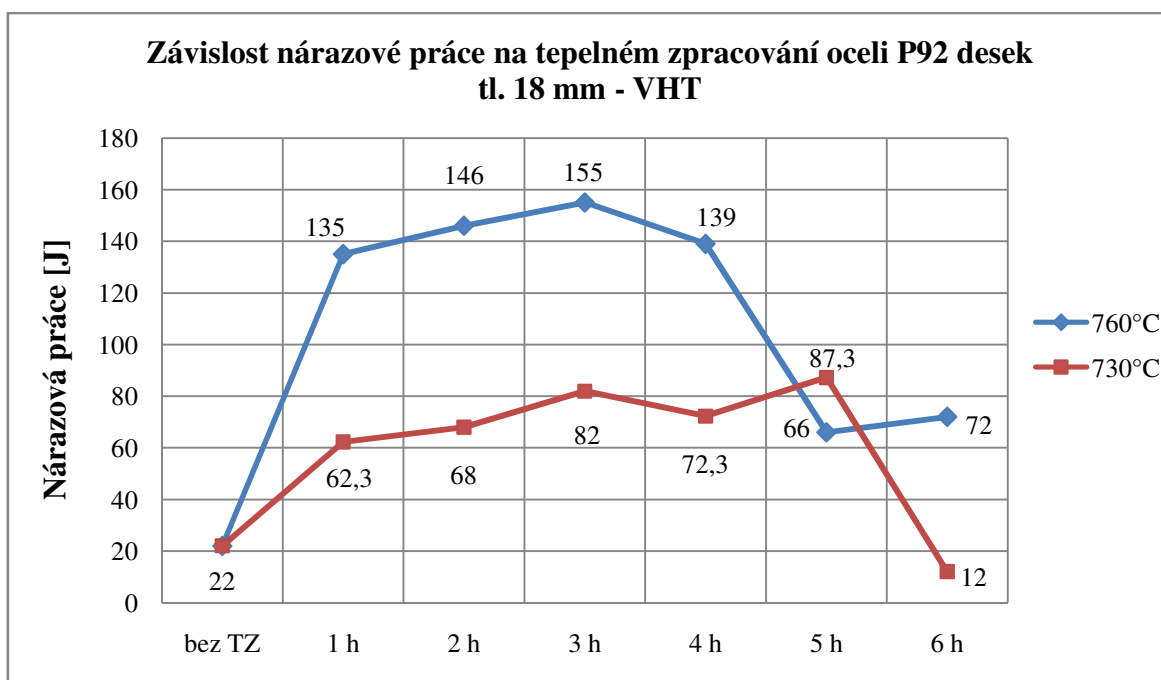
**Graf 16** – Srovnání průměrných hodnot nárazové práce při tepelném zpracování 760 °C - VWT



**Graf 17** – Srovnání průměrných hodnot nárazové práce při tepelném zpracování 760 °C – VHT



**Graf 18** – Závislost nárazové práce na tepelném zpracování - VWT



**Graf 19** – Závislost nárazové práce na tepelném zpracování - VHT

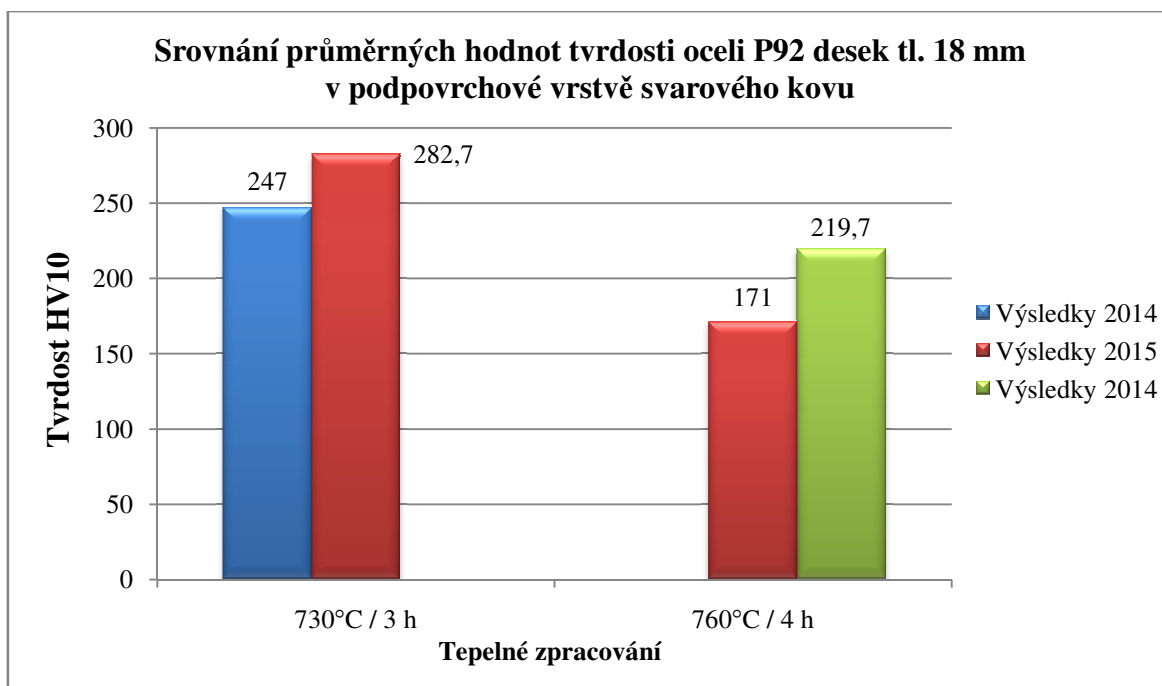
Při srovnání výsledků nárazové práce s předešlými experimenty bylo nutno nezahrnovat některé z výsledků této diplomové práce. Jedná se o hodnoty z oblasti VHT zkušebních desek 730/3/3 a 760/4/4, z důvodu nízké hodnoty nárazové práce vůči druhé porovnávané hodnotě.

Očekávaný trend výsledných hodnot nárazové práce by měl růst při delších dobách výdrže. V některých případech k takovému trendu opravdu došlo. V případě shrnutí všech výsledků pro dva teplotní režimy z hlediska nárazové práce je nutno brát ohled na to, že by se hlavní váha měla přiklánět zejména na hodnoty z oblasti svarového kovu – VWT. Tepelně ovlivněné oblasti – VHT nelze přiřazovat hlavní důležitost z toho důvodu, že při odběru zkušebního vzorku nemusí být přesné umístění vrubu v hranici ztavení, jak již bylo uvedeno. Z **grafu 18** pro VWT je zřejmé, že vyšších hodnot nárazové práce je dosaženo při teplotě tepelného zpracování 760 °C. V případě použití režimu zpracování s teplotou 730° C dostáváme však při některých dobách výdrže také uspokojivé výsledky nárazové práce. Při pohledu na **graf 19**, pro VHT, jsou vidět velmi vysoké hodnoty nárazové práce při teplotě zpracování 760° C, ale také při 730° C v případě výdrže 4 nebo 5 hodin. Při delší době výdrže pak dochází k poklesu jak meze pevnosti v tahu, tak i k poklesu hodnot nárazové práce. Podstatou je však najít tepelné zpracování, které bude nejvýhodnější, v ideálním případě, pro všechny mechanické vlastnosti. S ohledem na vliv teploty na pevnostní charakteristiky z předešlé kapitoly bude výhodnější volit tepelné

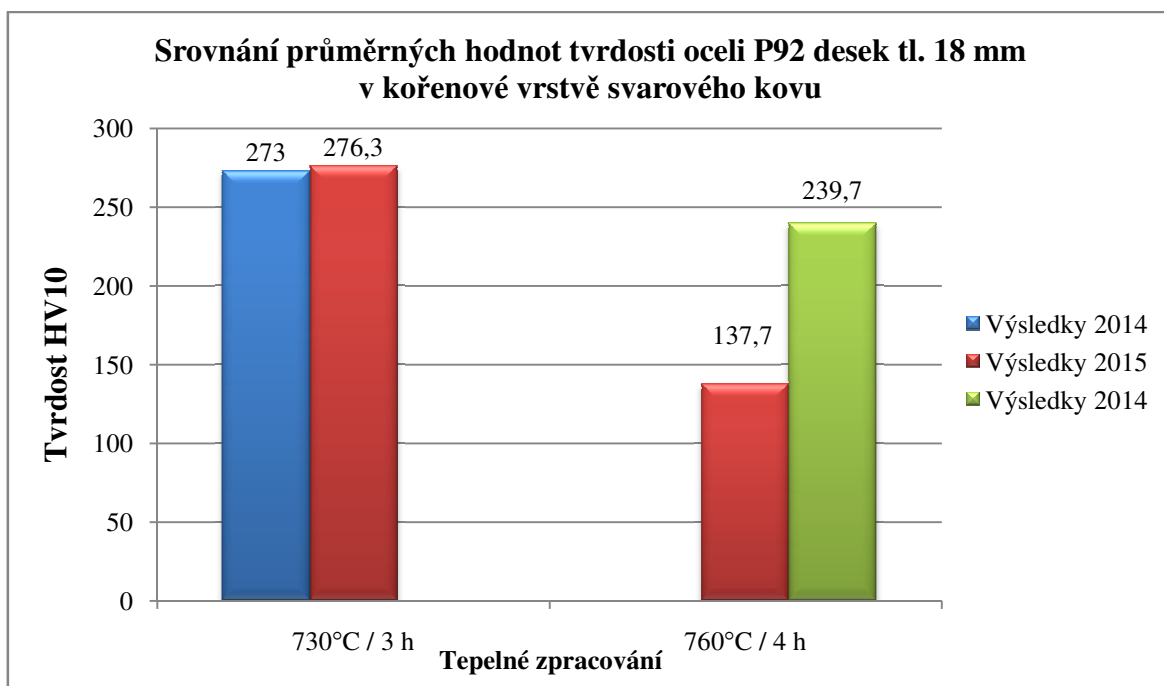
zpracování s teplotou 730° C a dobou výdrže 4 nebo 5 hodin, kdy dosáhneme velmi dobré hodnoty meze pevnosti v tahu, ale i dobré hodnoty nárazové práce.

### 5.3 Srovnání výsledků zkoušky tvrdosti

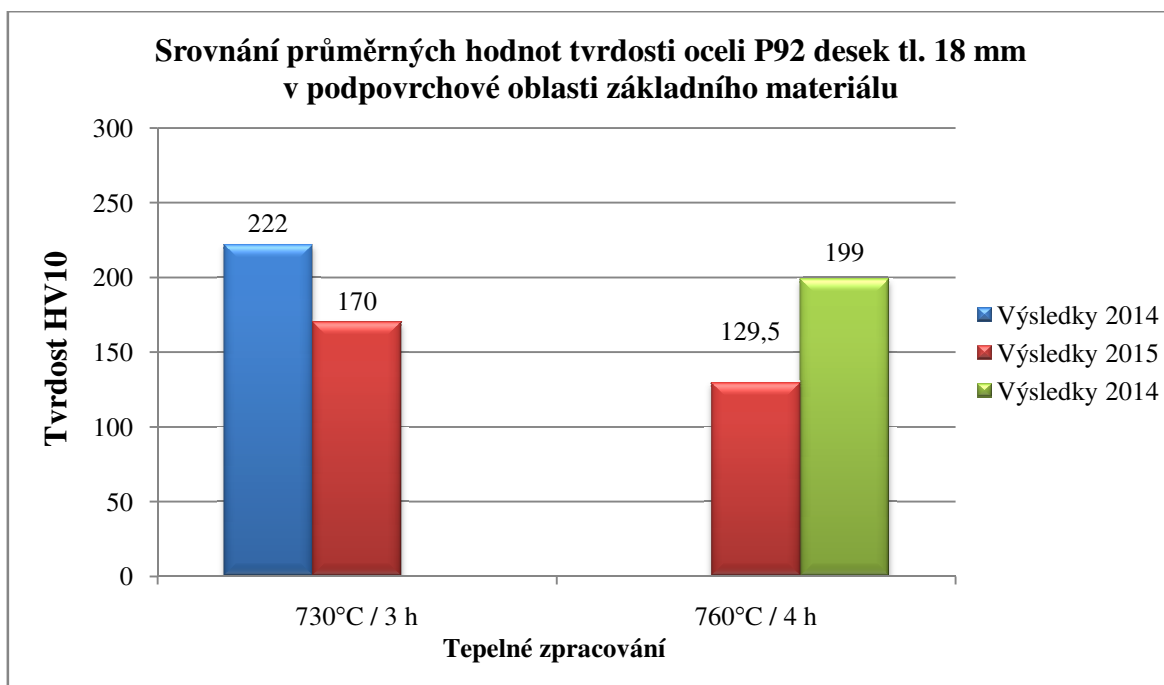
V této části diplomové práce jsou graficky znázorněny a porovnávány hodnoty tvrdosti HV10 z předešlých experimentů při různých režimech tepelného zpracování. K porovnání výsledků ze zkoušky tvrdosti bylo čerpáno z literatury [32,33 a 34]. Hodnoty byly porovnávány z obou linií, jak z podpovrchové linie, tak i z kořenové linie. Jak již bylo potvrzeno z kontroly mikrostruktury, pro tento experiment byl dodán materiál, který se po vykování nevhodně tepelně zpracoval, tím došlo k znehodnocení a rozpadu původní žádané martenzitické struktury. Tudíž nevyhovující struktura základního materiálu byla přítomna již před zahájením samotného svařování zkušebních svarových spojů. Proto je v této kapitole zaměřena pozornost na porovnání tvrdosti HV10 základního materiálu a také svarového kovu. Porovnání bylo provedeno se stejnými režimy tepelného zpracování, jaké byly aplikovány po svařování tohoto experimentu a také pro porovnání všech režimů různých tepelných zpracování, kde byly zahrnuty také hodnoty tohoto experimentu.



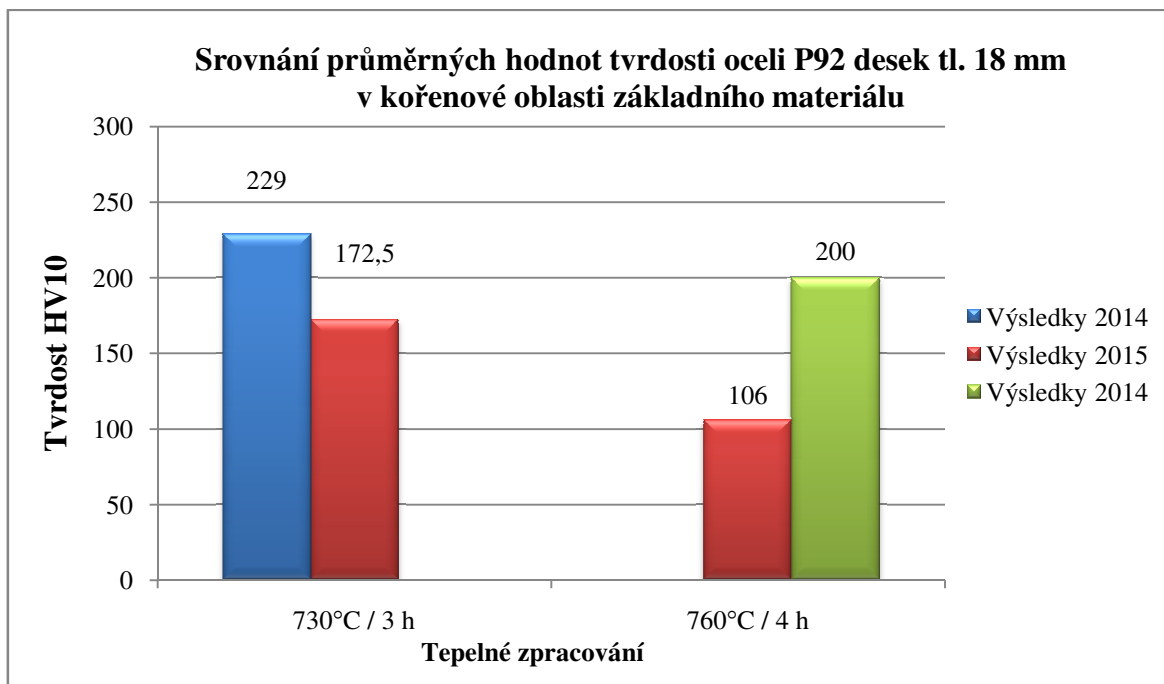
**Graf 20** – Srovnání tvrdosti svarového kovu v podpovrchové vrstvě s předešlými výsledky



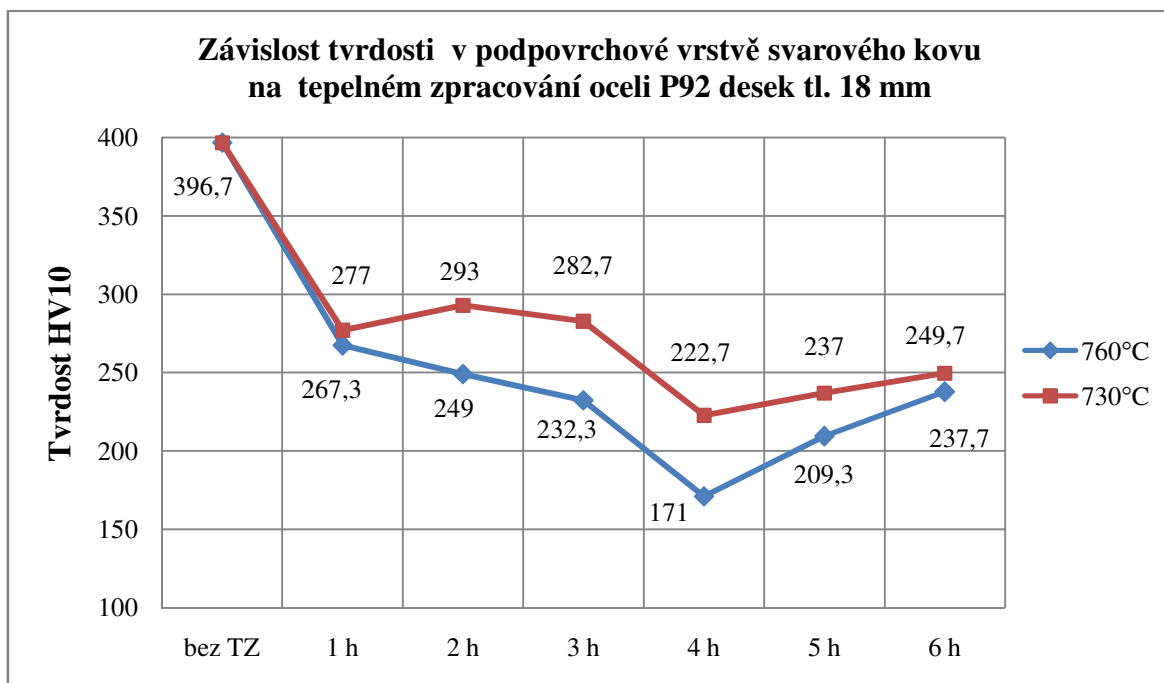
**Graf 21** – Srovnání tvrdosti svarového kovu v kořenové vrstvě s předešlými výsledky



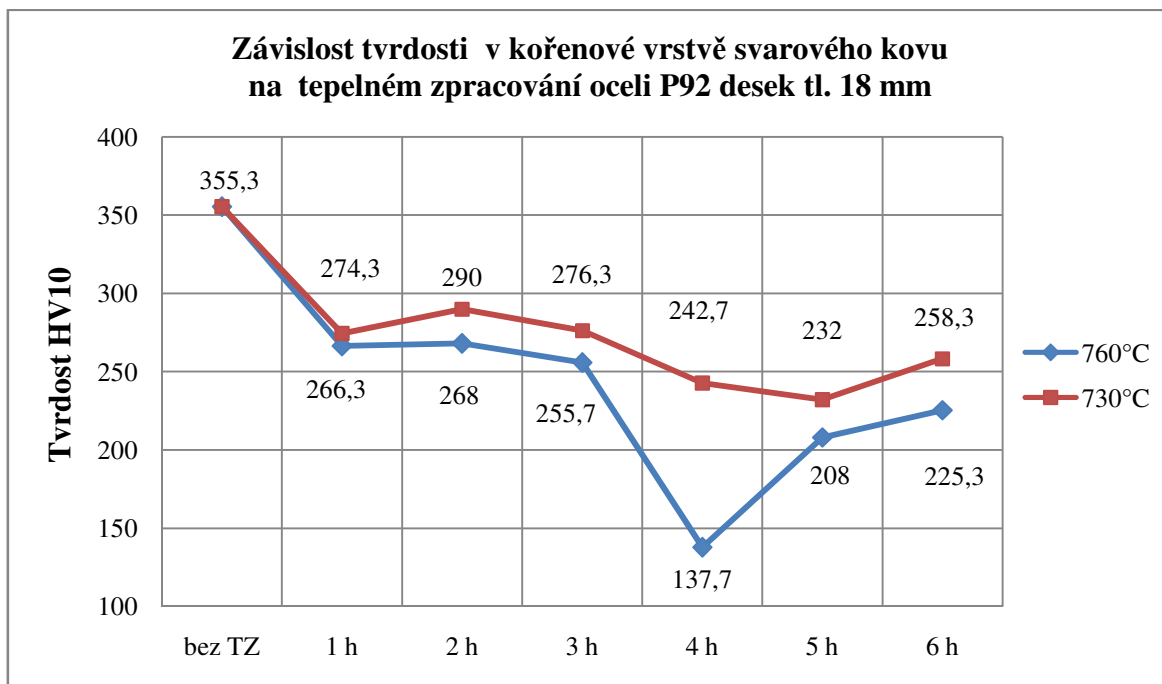
**Graf 22** – Srovnání tvrdosti základního materiálu v podpovrchové vrstvě s předešlými výsledky



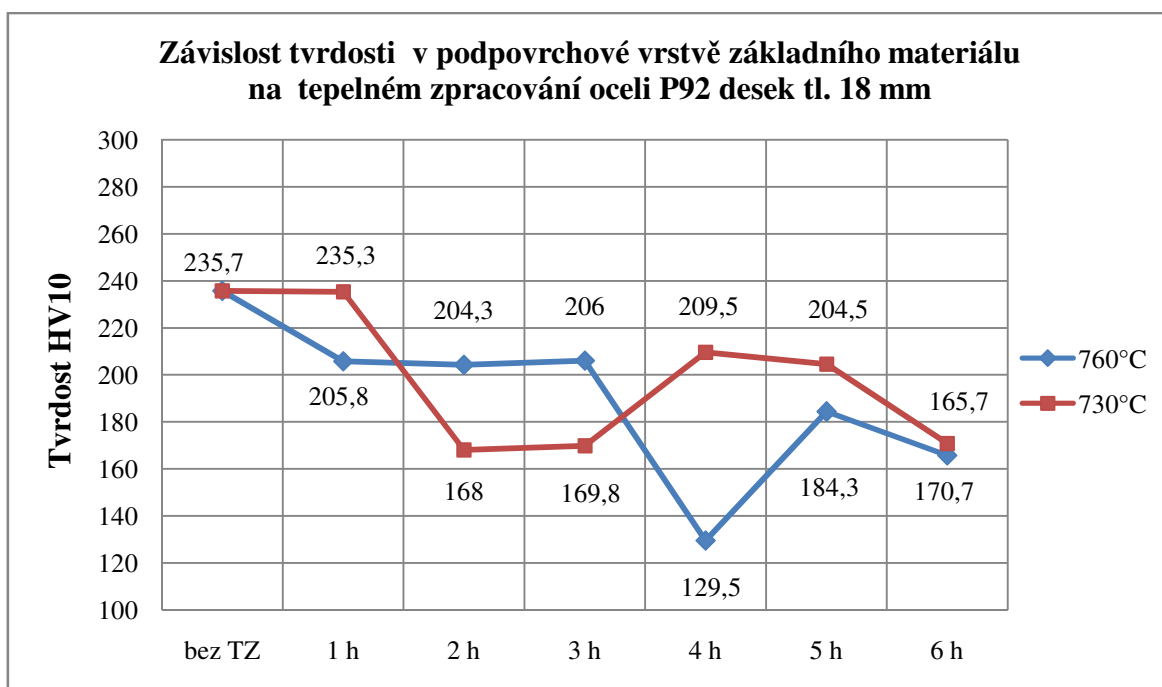
**Graf 23** – Srovnání tvrdosti základního materiálu v kořenové vrstvě s předešlými výsledky



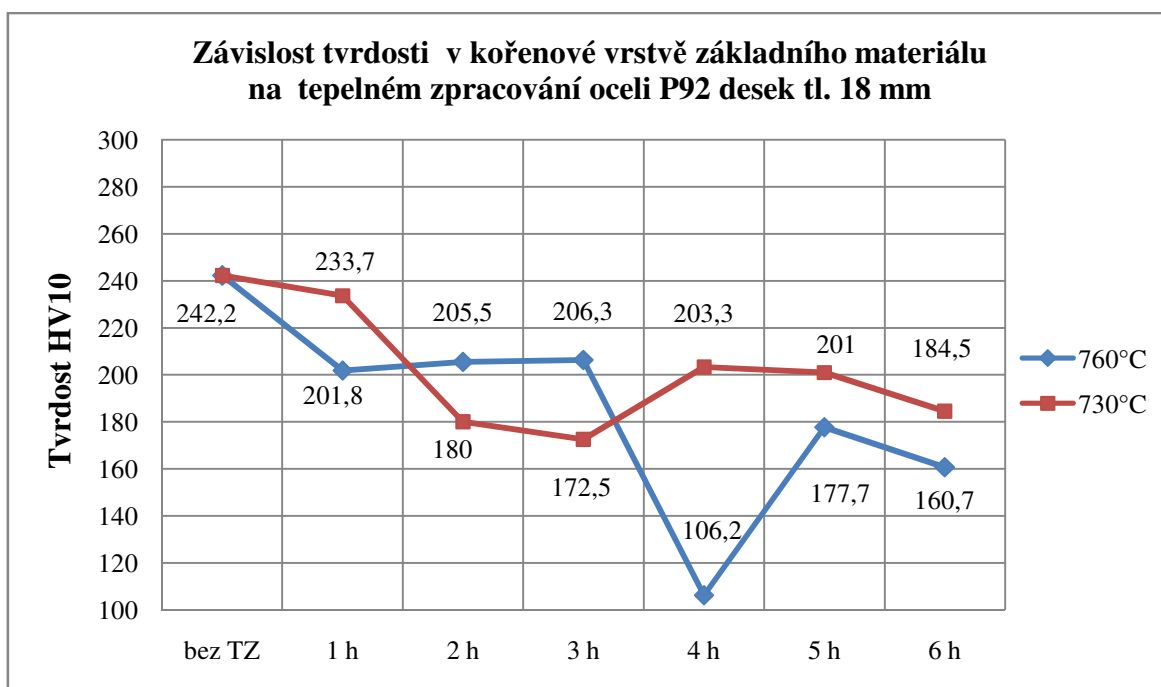
**Graf 24** – Závislost tvrdosti svarového kovu v podpovrchové vrstvě na tepelném zpracování, porovnání všech hodnot



**Graf 25** – Závislost tvrdosti svarového kovu v kořenové vrstvě na tepelném zpracování, porovnání všech hodnot



**Graf 26** – Závislost tvrdosti základního materiálu v podpovrchové vrstvě na tepelném zpracování, porovnání všech hodnot



**Graf 27** – Závislost tvrdosti základního materiálu v kořenové vrstvě na tepelném zpracování, porovnání všech hodnot

**Tab. 26** – Přehled všech hodnot tvrdosti pro svarový kov

| Tepelné zpracování | Tvrdost HV10        |                 | Tepelné zpracování | Tvrdost HV10        |                 |
|--------------------|---------------------|-----------------|--------------------|---------------------|-----------------|
|                    | Podpovrchová vrstva | Kořenová vrstva |                    | Podpovrchová vrstva | Kořenová vrstva |
| Bez TZ             | 396,7               | 355,3           | Bez TZ             | 396,7               | 355,3           |
| 730°C / 1h         | 277                 | 274,3           | 760°C / 1h         | 267,3               | 266,3           |
| 730°C / 2h         | 293                 | 290             | 760°C / 2h         | 249                 | 268             |
| 730°C / 3h         | 282,7               | 276,3           | 760°C / 3h         | 232,3               | 255,7           |
| 730°C / 4h         | 222,7               | 242,7           | 760°C / 4h         | 171                 | 137,7           |
| 730°C / 5h         | 237                 | 232             | 760°C / 5h         | 209,3               | 208             |
| 730°C / 6h         | 249,7               | 258,3           | 760°C / 6h         | 237,7               | 225,3           |

**Tab. 27** – Přehled všech hodnot tvrdosti pro základní materiál

| Tepelné zpracování | Tvrdost HV10        |                 | Tepelné zpracování | Tvrdost HV10        |                 |
|--------------------|---------------------|-----------------|--------------------|---------------------|-----------------|
|                    | Podpovrchová vrstva | Kořenová vrstva |                    | Podpovrchová vrstva | Kořenová vrstva |
| Bez TZ             | 235,7               | 242,2           | Bez TZ             | 235,7               | 242,2           |
| 730°C / 1h         | 235,3               | 233,7           | 760°C / 1h         | 205,8               | 201,8           |
| 730°C / 2h         | 168                 | 180             | 760°C / 2h         | 204,3               | 205,5           |
| 730°C / 3h         | 169,8               | 172,5           | 760°C / 3h         | 206                 | 206,3           |
| 730°C / 4h         | 209,5               | 203,3           | 760°C / 4h         | 129,5               | 106,2           |
| 730°C / 5h         | 204,5               | 201             | 760°C / 5h         | 184,3               | 177,7           |
| 730°C / 6h         | 170,7               | 184,5           | 760°C / 6h         | 165,7               | 160,7           |



Všechny hodnoty tvrdostí při všech tepelných zpracováních jsou pro přehlednost uvedeny v **tab. 26** pro svarový kov a v **tab. 27** pro základní materiál. Modrou barvou jsou pak označena políčka tepelného zpracování, které se uskutečnilo v rámci experimentu této diplomové práce.

V podpovrchové i kořenové vrstvě svarového kovu je naměřeno nižších hodnot při režimech tepelného zpracování s teplotou 760° C. Největší pokles tvrdosti v této oblasti byl zaznamenán u svarového spoje s tepelným zpracováním 760° C/ 4 h, kdy byla naměřena hodnota tvrdosti v podpovrchové oblasti 171 HV10 a v kořenové oblasti 137,7 HV10. Výrazný rozdíl hodnot tvrdosti je samozřejmě mezi tepelně nezpracovanými a zpracovanými svarovými spoji. Hodnoty tvrdosti svarového spoje bez tepelného zpracování vykazují tvrdost nad přípustnou hranicí 350 HV10. Při aplikaci tepelného zpracování 730° C 1 h, 2 h nebo 3 h se hodnoty tvrdosti výrazně snížily a drží se téměř ve stejné linii. Pokles tvrdosti při této teplotě pak nastává při výdrži delší než 3 hodiny. U režimu s teplotou 760° C je vykazován neustálý mírný pokles tvrdosti v závislosti na době výdrže až do hodnoty minima při tepelném zpracování 760° C/ 4 h, pak tvrdost mírně roste. Z tohoto důvodu můžeme jako o nejvhodnějším tepelném zpracování uvažovat možnost režimu 730° C po dobu výdrže 4 nebo 5 hodin.

U porovnání tvrdosti základního materiálu bylo hlavním cílem poukázat na podstatně nižší tvrdost svařených zkušebních desek použitých v tomto experimentu, oproti tvrdosti předešlých zkušebních desek. Základní materiál v podpovrchové i kořenové vrstvě měl výrazně nižší hodnoty tvrdosti. Křivky závislosti tvrdosti základního materiálu na tepelném zpracování jsou ovlivňovány nízkými hodnotami z tohoto experimentu diplomové práce a jsou v nich tvořeny propady. Trend závislosti tvrdosti základního na tepelném zpracování bez těchto hodnot by měl monotónně klesající charakter s prodlužováním doby výdrže.

## 6 DISKUSE DOSAŽENÝCH VÝSLEDKŮ

Hlavním předpokladem pro zpracování této diplomové práce bylo experimentálně podložit, jaký vliv mohou mít odlišné režimy tepelného zpracování po svařování na výsledné mechanické vlastnosti zhotovených zkušebních desek tloušťky 18 mm o rozměrech 250 x 250 mm. Materiál použitý pro svaření zkušebních desek byla martenzitická 9 % Cr ocel P92. Po svařování bylo na každou svařenou desku aplikováno odlišné tepelné zpracování s teplotami 730° C a 760° C. Dále bylo nutno provést nedestruktivní kontrolu a v hlavním případě destruktivní kontrolu, ze které se při celkovém vyhodnocení vychází.

Do závěrečného srovnání výsledných mechanických vlastností s předešlými experimenty nebyly zahrnuty některé z výsledných hodnot meze pevnosti v tahu a nárazové práce tohoto experimentu diplomové práce, jelikož by došlo k jistému znehodnocení výsledků předešlých experimentů a jejich neporovnatelnosti.

Při posuzování vlivu tepelného zpracování se vycházelo ze základních kritérií, jakož je mez pevnosti v tahu, nárazová práce a tvrdost. Hlavní a zásadní požadavek na materiál je vysoká mez pevnosti v tahu při zachování stále vysokých hodnot nárazové práce, přičemž hodnota tvrdosti by neměla překročit limitní hranici 350 HV10 v jakémkoliv místě svarového spoje i základního materiálu.

Prvním hlediskem k posouzení vlivu odlišných režimů tepelného zpracování na mechanické vlastnosti svařených zkušebních desek byly výsledky tahových zkoušek. Jako jedno z důležitých zjištění v tomto experimentu bylo to, že u zkušebních desek tepelně zpracovaných při 730° C bylo dosaženo vyšších hodnot meze pevnosti v tahu, než při aplikaci tepelného zpracování s teplotou 760° C. Tento trend pouze narušuje hodnota meze pevnosti získaná experimentem z této diplomové práce, která způsobuje v křivce závislosti pevnosti na tepelném zpracování výrazný propad. Z tohoto hlediska bude výhodnější volit teplotu 730° C, kdy jsou hodnoty meze pevnosti v tahu dostatečně vysoké i při delších dobách výdrže. Jedinou výjimkou bylo tepelné zpracování 730° C s dobou výdrže 6 hodin, kdy došlo k podstatnému poklesu meze pevnosti v tahu. Trend závislosti hodnot pevnosti na době tepelného zpracování má u 730° C mírně klesající charakter. V případě tepelného zpracování při teplotě 760° C se hodnoty meze pevnosti s rostoucí dobou výdrže výrazně nemění, s výjimkou 6 hodinové výdrže. Z pevnostního hlediska

by bylo nejvýhodnější volit tepelné zpracování s teplotou 730° C a dobou výdrže 4 nebo 5 hodin, kdy stále dochází k zachování meze pevnosti v tahu nad 700 MPa.

Druhým hlediskem je posouzení výsledků destruktivní zkoušky rázem v ohybu. Jak již bylo uvedeno v předešlých kapitolách, větší důležitost je přiklášena k hodnotám nárazové práce z oblasti svarového kovu. Aby mohly být výsledky ze zkoušky rázem v ohybu označeny jako vyhovující, nesmí hodnota nárazové práce klesnout pod normou stanovenou minimální hranicí 27 J. V závislosti na tepelném zpracování má nárazová práce vzhledem k prodlužování doby výdrže vzrůstající trend. Tentokrát je vyšších hodnot dosaženo při tepelném zpracování 760° C, a to jak v oblasti svarového kovu, tak i v tepelně ovlivněné oblasti svarového spoje. Opět byl zaznamenán pokles hodnot nárazové práce ve svarovém kovu při 6 hodinách výdrže a to v případě obou teplot. Nejvyšších hodnot nárazové práce bylo dosaženo tepelným zpracováním při 760° C s dobou výdrže 5 hodin, to však není vhodné volit s ohledem na výrazně nižší hodnoty meze pevnosti v tahu. Z tohoto důvodu lze posuzovat za nejvýhodnější režim tepelného zpracování s teplotou 730° C a výdrží 4 nebo 5 hodin, kdy jsou hodnoty nárazové práce jak v oblasti svarového kovu i teplem ovlivněné oblasti dostačující.

Jako poslední vyhodnocení byla provedena kontrola tvrdosti v jednotlivých oblastech svarového spoje. Výsledná tvrdost všech svařených zkušebních desek nepřekročila normou stanovený maximální limit tvrdosti 350 HV10. Průběh tvrdosti v jednotlivých oblastech ukázal, že nejvyšších hodnot tvrdosti bylo dosaženo ve svarovém kovu, kdežto v předešlých experimentech bylo nejvyšších hodnot tvrdosti dosaženo v tepelně ovlivněné oblasti svarového spoje. To může být důsledek toho, že v tepelně ovlivněné oblasti je výraznější vliv základního materiálu, který má v případě tohoto experimentu příliš nízké hodnoty tvrdosti. Naopak ve svarovém kovu je převážná část roztaveného přídavného materiálu, který je minimálně ovlivněn základním materiálem. Z porovnání dostupných výsledků je dosaženo vyšších hodnot tvrdosti při použití teploty 730° C než při teplotě 760° C ve svarovém kovu, jak v podpovrchové, tak i kořenové oblasti. S prodlužující dobou výdrže nedochází k výraznému kolísání hodnot tvrdosti.

Pro konečné zhodnocení vlivů různých režimů tepelného zpracování bylo nutné brát zřetel na všechna hlediska mechanických vlastností. S ohledem na tyto okolnosti lze jako nejvýhodnější variantu tepelného zpracování volit tepelné zpracování s teplotou 730° C a dobou výdrže 5 hodin, kdy jsou všechny požadované mechanické vlastnosti na dostatečně vysoké úrovni.

## 7 ZÁVĚR

Modifikované 9 % Cr oceli nacházejí své největší uplatnění v oblasti tepelné energetiky, jelikož tyto oceli díky svým specifickým vlastnostem mohou pracovat s ultra super kritickými parametry páry. Mezi relativně nové typy těchto ocelí patří i martenzitická ocel P92. Jelikož je chemické složení této oceli modifikováno přísadou wolframu do 2 % oproti předchozí martenzitické oceli P91, jsou předpokládány lepší vlastnosti při krátkodobém tečení. Co se týče vlastností při dlouhodobém tečení, jsou výsledky oceli P92 diskutabilní. V dostupné odborné literatuře není dostatečné množství informací o vlivu tepelného zpracování na mechanické vlastnosti svarových spojů. Proto hlavním cílem této práce bylo tedy stanovit nejoptimálnější režim tepelného zpracování svarových spojů oceli P92.

V rámci této diplomové práce bylo provedeno zhotovení zkušebních svarových spojů o tloušťce 18 mm, které byly svařeny technologiemi 141 a 111. Po svařování bylo provedeno tepelné zpracování zkušebních desek. Každá z takto svařených desek byla vystavena jinému režimu tepelného zpracování za účelem posouzení, jaký vliv bude mít daný režim tepelného zpracování na výsledné mechanické vlastnosti. Všechny zkušební desky byly podrobeny nedestruktivním a destruktivním zkouškám svarových spojů. Následně bylo provedeno vyhodnocení dosažených výsledků experimentu této diplomové práce a srovnání s výsledky předcházejících experimentů zabývajících se totožnou problematikou.

Ze srovnání dosažených výsledků plyne, že zkoušky provedené v rámci tohoto experimentu neodpovídaly očekávaným hodnotám mechanických vlastností charakteristickým pro ocel P92 a proto vznikly jisté obavy o správnosti provedených zkoušek. V průběhu experimentu této diplomové práce bylo potvrzeno, že provedené zkoušky proběhly správně, přičemž byla zjištěna příčina těchto neuspokojivých výsledků mechanických vlastností. Kontrola mikrostruktury prokázala, že základní materiál byl před svařováním vyžíhán na měkko. S ohledem na dosažené výsledky se otevírá potřeba provést další experimenty, které by více upřesnily vliv tepelného zpracování na mechanické vlastnosti svarových spojů oceli P92, svařených kombinací metod 141 + 111.

**Poděkování**

Tímto děkuji mému vedoucímu práce panu doc. Ing. Petru Mohylovi, Ph.D. a panu Ing. Zdeňku Štorkánovi za odborné vedení a poskytnutí velkého množství cenných rad a informací při tvorbě diplomové práce.

Bc. Robert Jurásek

## 8 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] MOHYLA, P. HAVELKA, L. STERNADELOVÁ, K. *Oceli pro nadkritické bloky tepelných elektráren a jejich svařitelnost*. All for power. 2013, č.3. Dostupné z: <http://www.allforpower.cz/UserFiles/file/flash.pdf>
- [2] FRANKE, J. KRÁL, R. WITTCHOW, E. *Steam Generators for the Next Generation of Power Plants Aspects of Design and Operating Performance*. Siemens energy. 1999, č.12. Dostupné z: [http://www.energy.siemens.com/co/pool/hq/power-generation/power-plants/steam-power-plant-solutions/benson%20boiler/Steam\\_Generators\\_for\\_the\\_Next\\_Generation\\_of\\_Power\\_Plants.pdf](http://www.energy.siemens.com/co/pool/hq/power-generation/power-plants/steam-power-plant-solutions/benson%20boiler/Steam_Generators_for_the_Next_Generation_of_Power_Plants.pdf)
- [3] KOUKAL, J. SCHWARZ, D. SONDEL, M. HAJDÍK, J. *Svařitelnost a vlastnosti svarových spojů 9% Cr modifikovaných žárupevných ocelí*. 1. vyd. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2011, 92 s. ISBN 978-80-248-2474-1.
- [4] J.C. VAILLANT, B. VANDENBERGHE, B. HAHN, H. HEUSER a C. JOCHUM. T/P23, 24, 911 and 92: *New grades for advanced coal-fired power plants-Properties and experience*. Science Direct. 2008, č.85.
- [5] ENNIS, CZYRSKA-FILEMONOWICZ a ZIELIŃSKA-LIPIEC. *Influence of heat treatments on microstructural parameters and mechanical properties of P92 steel*. Materials Science and Technology. Leeds: Maney Publishing, 2000.
- [6] KOUKAL, J. *Požadavky na provedení tepelného zpracování svarových spojů v energetice*. PROMATTEN. 2011, č.4. Dostupné z: <http://www.allforpower.cz/UserFiles/file/flash.pdf>
- [7] HERNAS, A. JONŠTA, Z. TVRDÝ, M. ČÍŽEK, L. PURMENSKÝ, J. *Žárupevné oceli a slitiny*. 1. vyd. V Žilině: ZUSI, 2002, 389 s. ISBN 80-968-6056-9.
- [8] VODÁREK, V. *Fyzikální metalurgie modifikovaných (9-12)%Cr ocelí*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2003, 163 s. ISBN 80-248-0329-1.
- [9] JAKOBOVÁ, A. a kol. Proc of VI th International Symposium on Creep resistant Metallic Materials, Kostelec, 1981
- [10] FOLDYNA, V. *Perspektivní nízkolegované a feritické Cr oceli pro jednotky velkých výkonů*. All for Power [online]. Ostrava: Konstrukce Media, 2008, 27.4.2009 14:46 [cit. 2015-04-25]. Dostupné z: <http://www.allforpower.cz/clanek/perspektivni-nizkolegovane-a-feriticke-cr-oceli-pro-jednotky-velkych-vykonu/>
- [11] TAHALA, T. SAKURAI, H. HORIMOTO, H. *Development of welding consumables for 9 Cr – 1,8 W steel designed for USC boiler tubes and pipes*. Materials for Advanced power engineering, Part I, 1994, s. 395-404
- [12] HALD, J. *Metallurgy and creep properties of new 9-12% Cr steels*. Steel Research 67, No9, 1996
- [13] HIKADA, K. a kol. *Development of 12 Cr Steel for USC 650° C Steem Turbine Rotors* in Proc.of the 5th conf. Materials for advanced Power Engineering. Weld in Liege, Belgia, October 1994, Part I,s.281-290
- [14] FOLDYNA, V. *Microstructural stability of ferritic 9-12Cr steels*, COST 501 Report, Brussels, 1994.

- [15] FUJITA, T.: *Advances in 9-12%Cr heat resistant steels for power plants*, Proc. Of the 3rd EPRI conference on advances in materials technology for fossil power plants, R. Viswanathan et. al. Eds., IOM, Swansea 2001,33.
- [16] HOSOI, Y. a kol. *Precipitation behavior of Laves phase and its effect on toughness of 9 Cr – 2 Mo ferritic martensitic steel*. Journal of Nuclear Materials, 1986,s.461 - 467
- [17] TURKDOAN, E.T. *Fundamentals of Steelmaking*. University Press, Cambridge, 1996
- [18] FOLDYNA, V. JAKOBOVÁ, A. VODÁREK, V. KUBOŇ, Z. *Chromium modified steels metallurgical understanding*
- [19] SAWARAGI, Y. ISEDA, A. OGAKAWA, K. Proc. Int.Conf.Mater for Advanced Power Eng and other. Appl. Liege, 1994
- [20] STRANG, A. VODÁREK, V. *Microstructural stability of high chromium ferritic power plant steels*, Proc. Microstructural development and stability in high chromium ferritic power plant steels, A. Strang., IOM, Cambridge 1997, 31.
- [21] BRÜHL, F. HAARMANN, H. *Vernhalten des 9 % - Chromstahles X10CrMoVNb 91 im Kurz – und Langzeitversuch*. Teil 1: Grundwerkstoff, VGB Kraftwerkstechnik 69, Heft 12, Dezember, 1989.
- [22] KOUKAL, J. *Svařování nové oceli P91 pro energetiku*. Zváranie/Svařování, 1998.roč.47,č.2.str.27-32,ISSN 0044-5525
- [23] KUBOŇ, Z. FOLDYNA, V. VODÁREK, V.: *Analysis of strengthening mechanisms in 9 to 12%Cr Steels*, Proc. Microstructural stability of creep resistant alloys for high temperature plant applications, A. Strang et al. Eds., IOM, Sheffield 1998, 257.
- [24] HAJDÍK, J. *Svařitelnost a vlastnosti svarových spojů 9÷12% Cr modifikovaných žárupevných ocelí: autoreferát doktorské disertační práce*. 1. vyd. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2011, 36 s. ISBN 978-80-248-2471-0.
- [25] HALD, J.: *Microstructure stability of steels P92 and P122*, Proc. Of the 3rd EPRI conference on advances in materials technology for fossil power plants, R. Viswanathan et al. Eds., IOM, Swansea 2001, 115.
- [26] HALD, J. KORCAKOVA, L.: *Precipitate stability in creep resistant ferritic steels*, Proc. Sicherheit und Verfügbarkeit in der Energietechnik, 28 MPA Seminar, Stuttgart 2002, 52.1.
- [27] KORCAKOVA, L. HALD, J.: *Investigations of Laves phase in 9CrW steels by using FEGSEM and image analysis*, Proc. Of the 10th International conference on creep and fracture of engineering materials and structures, part Creep resistant materials, Teris 2002, Prague 2001, 221.
- [28] ENNIS, P. J.; CZYRSKA-FILEMONOWICZ, A. *Recent Advances in Creep Resistant Steels for Power Plant Applications*. 2003, vol.28, Parts 3&4. Dostupné z:<http://www.ias.ac.in/sadhana/Pdf2003JunAug/Pe1113.pdf>
- [29] Metallurgical evolution & creep strength of 9-12% Cr steels: Industrial partner : CEV-SETVAL VALLOUREC group. In: PANAIT, Clara. *Centre des Matériaux* [online]. 2010 [cit. 2015-05-04]. Dostupné z:<http://www.mat.mines-paristech.fr/Donnees/data10/1068-Panait.pdf>

[30] SVOBODOVÁ, M. *Aplikační omezení žárovevné oceli P92* [online]. 2009 [cit. 2015-05-04]. Dostupné z: <http://www.allforpower.cz/clanek/aplikacni-omezeni-zaropevne-oceli-p92/>

[31] Přídavné materiály pro stavbu elektráren. In: *Böhler Welding Group* [online]. 2005 [cit.2015-05-05]. Dostupné z: [http://www.bohler-uddeholm.cz/media/Svary\\_oceli\\_elektrarny.pdf](http://www.bohler-uddeholm.cz/media/Svary_oceli_elektrarny.pdf)

[32] MASTELA, T. *Studium mechanických vlastností svarových spojů oceli P92: Study Of Mechanical Properties Of P92 Welded Joints Student: Bc. Tomáš Mastela Vedoucí diplomové práce: Ing. Petr Mohyla, Ph.D. Ostrava. Ostrava, 2012. Diplomová práce. VŠB - Technická univerzita Ostrava. Vedoucí práce doc. Ing. Petr Mohyla, Ph.D.*

[33] VOJTAS, A. *Měření mechanických vlastností svarového spoje oceli P92: Measurement of Mechanical Properties of P92 Welded Joint. Ostrava, 2014. Diplomová práce. VŠB - Technická univerzita Ostrava. Vedoucí práce doc. Ing. Petr Mohyla, Ph.D.*

[34] VRÁŽEL, M. *Vliv tepelného zpracování na vlastnosti svarového spoje oceli P92, svařeného metodou 111: Influence of Heat Treatment on Properties of P92 Welded Joint, Made by Method 111. Ostrava, 2014. Bakalářská práce. VŠB - Technická univerzita Ostrava. Vedoucí práce doc. Ing. Petr Mohyla, Ph.D.*



## 9 SEZNAM POUŽITÝCH OBRÁZKŮ

| Číslo               | Popis  | Zdroj | Strana |
|---------------------|--|-------|--------|
| Obr. 1              | <i>Použití vybraných materiálů pro USC bloky v závislosti na tlaku a teplotě</i>   | [2]   | - 8 -  |
| Obr. 2              | <i>Pevnost při tečení vybraných materiálů pro USC bloky</i>  | [2]   | - 9 -  |
| Obr. 3              | <i>Porovnání rychlosti koroze jednotlivých materiálů pro USC bloky při 650°C</i>   | [4]   | - 10 - |
| Obr. 4              | <i>Teplotní režim při svařování ocelí P91 a P92</i>  | [6]   | - 12 - |
| Obr. 5              | <i>Teplotní režim při svařování oceli VM 12 - SHC</i>  | [6]   | - 12 - |
| Obr. 6              | <i>Schéma vývoje modifikovaných 9-12 % Cr ocelí</i>  | [3]   | - 14 - |
| Obr. 7              | <i>Vliv obsahu molybdenu na pevnost při tečení</i>   | [10]  | - 16 - |
| Obr. 8              | <i>Vliv obsahu <math>\delta</math>-feritu na hodnoty vrubové houževnatosti</i>   | [7]   | - 20 - |
| Obr. 9              | <i>Lavesova fáze, Z-fáze, částice <math>M_{23}C_6</math> a MX v mikrostruktuře oceli P92</i>                             | [29]  | - 22 - |
| Obr. 10             | <i>Oxidické vrstvy na povrchu oceli P92</i>  | [28]  | - 25 - |
| Obr. 11             | <i>ARA diagram oceli P92</i>   | [30]  | - 27 - |
| Obr. 12             | <i>Mikrostruktura oceli P92, austenitizace 1070° C /2 h, popouštění 715° C /2 h</i>                                      | [5]   | - 29 - |
| Obr. 13             | <i>Mikrostruktura oceli P92, austenitizace 1070° C/2 h, popouštění 775° C/2 h</i>  | [5]   | - 29 - |
| Obr. 14             | <i>Mikrostruktura oceli P92, austenitizace 1070° C/2 h, popouštění 835° C/2 h</i>  | [5]   | - 30 - |
| Obr. 15             | <i>Mikrostruktura oceli P92, levá strana - austenitizace 970° C/2 h, pravá strana - austenitizace 1145° C/2 h</i>        | [5]   | - 30 - |
| Obr. 16             | <i>Porovnání pevnosti do přetržení při 600° C</i>  | [5]   | - 32 - |
| Obr. 17             | <i>Závislost napětí na hodnotě Larson - Millerova parametru pro hodnocení svarový spoj i základní materiál oceli P92</i> | [24]  | - 33 - |
| EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST |  |       |        |
| Obr. 18             | <i>Úprava svarových ploch</i>  |       | - 38 - |
| Obr. 19             | <i>Spoj po zavaření kořene metodou 141</i>   |       | - 38 - |
| Obr. 20             | <i>Svařovací zdroj MagicWave 3000 Comfort G/F a Trans Pocket 4000 CEL</i>  |       | - 39 - |
| Obr. 21             | <i>Zhotovený svarový spoj</i>  |       | - 39 - |
| Obr. 22             | <i>Digitální teploměr OMEGA HH11</i>   |       | - 40 - |
| Obr. 23             | <i>Pec pro tepelné zpracování</i>  |       | - 41 - |
| Obr. 24             | <i>Schéma zkoušky tvrdosti tupého spoje</i>  |       | - 51 - |
| Obr. 25             | <i>Vpichy po měření tvrdosti na vzorku 760/4/4</i>   |       | - 51 - |
| Obr. 26             | <i>Makrostruktura vzorku 730/2/2, zvětšení 2x</i>  |       | - 56 - |
| Obr. 27             | <i>Makrostruktura vzorku 730/3/3, zvětšení 2x</i>  |       | - 57 - |

|         |  |        |
|---------|--|--------|
| Obr. 28 | <i>Makrostruktura vzorku 730/6/1, zvětšení 2x</i>  | - 57 - |
| Obr. 29 | <i>Makrostruktura vzorku 760/4/4, zvětšení 2x</i>  | - 57 - |
| Obr. 30 | <i>Makrostruktura vzorku 760/5/6, zvětšení 2x</i>  | - 58 - |
| Obr. 31 | <i>Lisovací zařízení Struers ProntoPress - 20</i>  | - 59 - |
| Obr. 32 | <i>Leštící zařízení Struers TegraPol - 35</i>  | - 59 - |
| Obr. 33 | <i>Krycí housenka svarového kovu, zvětšení 200x</i>  | - 60 - |
| Obr. 34 | <i>Tepelně ovlivněná oblast v podpovrchové linii, zvětšení 100x</i>  | - 60 - |
| Obr. 35 | <i>Základní materiál v podpovrchové linii, zvětšení 100x</i>   | - 60 - |
| Obr. 36 | <i>Vyžíhaná housenka svarového kovu v oblasti kořene, zvětšení 100x</i>                                      | - 61 - |
| Obr. 37 | <i>Tepelně ovlivněná oblast kořenové linie s <math>\delta</math>-feritem ve svarovém kovu, zvětšení 200x</i> | - 61 - |
| Obr. 38 | <i>Základní materiál v kořenové linii, zvětšení 100x</i>   | - 61 - |
| Obr. 39 | <i>Základní materiál v kořenové linii, zvětšení 500x</i>   | - 62 - |
| Obr. 40 | <i>Krycí housenka svarového kovu s <math>\delta</math>-feritem, zvětšení 200x</i>                            | - 62 - |
| Obr. 41 | <i>Krycí housenka svarového kovu s <math>\delta</math>-feritem, zvětšení 500x</i>                            | - 62 - |
| Obr. 42 | <i>Tepelně ovlivněná oblast v podpovrchové linii, zvětšení 200x</i>  | - 63 - |
| Obr. 43 | <i>Základní materiál v podpovrchové linii, zvětšení 200x</i>   | - 63 - |
| Obr. 44 | <i>Oblast svarového kovu v kořenové linii, zvětšení 200x</i>   | - 63 - |
| Obr. 45 | <i>Tepelně ovlivněná oblast v kořenové linii, zvětšení 100x</i>  | - 64 - |
| Obr. 46 | <i>Základní materiál v kořenové linii, zvětšení 100x</i>   | - 64 - |
| Obr. 47 | <i>Oblast svarového kovu v podpovrchové linii, zvětšení 500x</i>   | - 64 - |
| Obr. 48 | <i>Tepelně ovlivněná oblast v podpovrchové linii, zvětšení 100x</i>  | - 65 - |
| Obr. 49 | <i>Základní materiál v podpovrchové linii, zvětšení 100x</i>   | - 65 - |
| Obr. 50 | <i>Oblast svarového kovu v kořenové linii, zvětšení 200x</i>   | - 65 - |
| Obr. 51 | <i>Tepelně ovlivněná oblast v kořenové linii, zvětšení 200x</i>  | - 66 - |
| Obr. 52 | <i>Základní materiál v kořenové linii, zvětšení 200x</i>   | - 66 - |
| Obr. 53 | <i>Oblast svarového kovu v podpovrchové linii, zvětšení 200x</i>   | - 66 - |
| Obr. 54 | <i>Tepelně ovlivněná oblast v podpovrchové linii, zvětšení 100x</i>  | - 67 - |
| Obr. 55 | <i>Základní materiál v podpovrchové linii, zvětšení 200x</i>   | - 67 - |
| Obr. 56 | <i>Základní materiál v podpovrchové linii, zvětšení 500x</i>   | - 67 - |
| Obr. 57 | <i>Oblast svarového kovu v kořenové linii, zvětšení 200x</i>   | - 68 - |
| Obr. 58 | <i>Tepelně ovlivněná oblast v kořenové linii, zvětšení 200x</i>  | - 68 - |
| Obr. 59 | <i>Základní materiál v kořenové linii, zvětšení 200x</i>   | - 68 - |

## 10 SEZNAM POUŽITÝCH TABULEK

| Číslo               | Popis  | Zdroj | Strana |
|---------------------|--|-------|--------|
| Tab. 1              | <i>Přehled materiálů používaných pro konstrukci nadkritických bloků</i>                                | [1]   | - 7 -  |
| Tab. 2              | <i>Aplikace materiálů používaných pro nadkritické bloky</i>  | [1]   | - 7 -  |
| Tab. 3              | <i>Chemické složení používaných materiálů pro konstrukci nadkritických bloků</i>                       | [1]   | - 9 -  |
| Tab. 4              | <i>Mechanické vlastnosti materiálů pro konstrukci nadkritických bloků</i>                              | [3]   | - 10 - |
| Tab. 5              | <i>Chemické složení oceli P91</i>  | [3]   | - 23 - |
| Tab. 6              | <i>Mechanické vlastnosti oceli P91</i>   | [3]   | - 23 - |
| Tab. 7              | <i>Chemické složení oceli P92</i>  | [24]  | - 24 - |
| Tab. 8              | <i>Mechanické vlastnosti oceli P92</i>   | [24]  | - 24 - |
| Tab. 9              | <i>Chemické složení oceli P92 od firmy Nippon Steel</i>  | [5]   | - 28 - |
| Tab. 10             | <i>Výsledné mikrostruktury při různých režimech TZ</i>   | [5]   | - 28 - |
| Tab. 11             | <i>Výsledky mechanických zkoušek pro různé režimy TZ oceli P92</i>                                     | [5]   | - 31 - |
| EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST |  |       |        |
| Tab. 12             | <i>Chemické složení základního materiálu</i>   | -     | - 36 - |
| Tab. 13             | <i>Mechanické vlastnosti a tvrdost základního materiálu při 20 °C</i>                                  | -     | - 36 - |
| Tab. 14             | <i>Mechanické vlastnosti a tvrdost základního materiálu při 350 °C</i>                                 | -     | - 36 - |
| Tab. 15             | <i>Chemické složení přídavného materiálu – drát (v hm. %)</i>  | [31]  | - 37 - |
| Tab. 16             | <i>Mechanické vlastnosti přídavného materiálu při běžné teplotě po tepelném zpracování – drát</i>      | [31]  | - 37 - |
| Tab. 17             | <i>Chemické složení přídavného materiálu – elektroda (v hm. %)</i>                                     | [31]  | - 37 - |
| Tab. 18             | <i>Mechanické vlastnosti přídavného materiálu při běžné teplotě po tepelném zpracování – elektroda</i> | [31]  | - 37 - |
| Tab. 19             | <i>Přehled tepelného zpracování zkušebních svarových spojů</i>   | -     | - 41 - |
| Tab. 20             | <i>Výsledky kapilární zkoušky zkušebních desek</i>   | -     | - 42 - |
| Tab. 21             | <i>Výsledky zkoušky prozářením zkušebních desek</i>  | -     | - 43 - |
| Tab. 22             | <i>Výsledky příčné zkoušky tahem oceli P92</i>   | -     | - 44 - |
| Tab. 23             | <i>Výsledky ze zkoušky rázem v ohybu oceli P92</i>   | -     | - 47 - |
| Tab. 24             | <i>Výsledky ze zkoušky tvrdosti HV10 oceli P92</i>   | -     | - 52 - |
| Tab. 25             | <i>Výsledky ze zkoušky makrostruktury</i>  | -     | - 56 - |
| Tab. 26             | <i>Přehled všech hodnot tvrdosti pro svarový kov</i>   | -     | - 80 - |
| Tab. 27             | <i>Přehled všech hodnot tvrdosti pro základní materiál</i>   | -     | - 80 - |

## 11 SEZNAM POUŽITÝCH GRAFŮ

| Číslo   | Popis   | Strana |
|---------|---|--------|
| Graf 1  | <i>Srovnání výsledků mezi pevnosti pro různá tepelná zpracování</i>   | - 45 - |
| Graf 2  | <i>Závislost meze pevnosti na tepelném zpracování</i>   | - 45 - |
| Graf 3  | <i>Srovnání výsledků nárazové práce pro různá tepelná zpracování - VWT</i>  | - 48 - |
| Graf 4  | <i>Závislost výsledků nárazové práce na tepelném zpracování - VWT</i>   | - 48 - |
| Graf 5  | <i>Srovnání výsledků nárazové práce pro různá tepelná zpracování – VHT</i>  | - 49 - |
| Graf 6  | <i>Závislost výsledků nárazové práce na tepelném zpracování - VHT</i>   | - 49 - |
| Graf 7  | <i>Výsledná tvrdost v podpovrchové oblasti při teplotě zpracování 730 °C</i>  | - 53 - |
| Graf 8  | <i>Výsledná tvrdost v podpovrchové oblasti při teplotě zpracování 760 °C</i>  | - 53 - |
| Graf 9  | <i>Výsledná tvrdost v kořenové oblasti při teplotě zpracování 730 °C</i>  | - 54 - |
| Graf 10 | <i>Výsledná tvrdost v kořenové oblasti při teplotě zpracování 760 °C</i>  | - 54 - |
| Graf 11 | <i>Srovnání průměrné meze pevnosti při tepelném zpracování 730 °C</i>   | - 70 - |
| Graf 12 | <i>Srovnání průměrné meze pevnosti při tepelném zpracování 760 °C</i>   | - 71 - |
| Graf 13 | <i>Závislost průměrné meze pevnosti na tepelném zpracování</i>  | - 71 - |
| Graf 14 | <i>Srovnání průměrných hodnot nárazové práce při tepelném zpracování 730 °C - VWT</i>                               | - 72 - |
| Graf 15 | <i>Srovnání průměrných hodnot nárazové práce při tepelném zpracování 730 °C – VHT</i>                               | - 73 - |
| Graf 16 | <i>Srovnání průměrných hodnot nárazové práce při tepelném zpracování 760 °C - VWT</i>                               | - 73 - |
| Graf 17 | <i>Srovnání průměrných hodnot nárazové práce při tepelném zpracování 760 °C – VHT</i>                               | - 74 - |
| Graf 18 | <i>Závislost nárazové práce na tepelném zpracování - VWT</i>  | - 74 - |
| Graf 19 | <i>Závislost nárazové práce na tepelném zpracování - VHT</i>  | - 75 - |
| Graf 20 | <i>Srovnání tvrdosti svarového kovu v podpovrchové vrstvě s předešlými výsledky</i>                                 | - 76 - |
| Graf 21 | <i>Srovnání tvrdosti svarového kovu v kořenové vrstvě s předešlými výsledky</i>                                     | - 77 - |
| Graf 22 | <i>Srovnání tvrdosti základního materiálu v podpovrchové vrstvě s předešlými výsledky</i>                           | - 77 - |
| Graf 23 | <i>Srovnání tvrdosti základního materiálu v kořenové vrstvě s předešlými výsledky</i>                               | - 78 - |
| Graf 24 | <i>Závislost tvrdosti svarového kovu v podpovrchové vrstvě na tepelném zpracování, porovnání všech hodnot</i>       | - 78 - |
| Graf 25 | <i>Závislost tvrdosti svarového kovu v kořenové vrstvě na tepelném zpracování, porovnání všech hodnot</i>           | - 79 - |
| Graf 26 | <i>Závislost tvrdosti základního materiálu v podpovrchové vrstvě na tepelném zpracování, porovnání všech hodnot</i> | - 79 - |
| Graf 27 | <i>Závislost tvrdosti základního materiálu v kořenové vrstvě na tepelném zpracování, porovnání všech hodnot</i>     | - 80 - |

**12 SEZNAM PŘÍLOH**

| Označení  | Název  | Počet listů |
|-----------|--|-------------|
| Příloha A | <i>Záznam o svařování zkušební desky č. 730/2/2</i>        | 2           |
| Příloha B | <i>Záznam o svařování zkušební desky č. 730/3/3</i>        | 2           |
| Příloha C | <i>Záznam o svařování zkušební desky č. 730/6/1</i>        | 2           |
| Příloha D | <i>Záznam o svařování zkušební desky č. 760/4/4</i>        | 2           |
| Příloha E | <i>Záznam o svařování zkušební desky č. 760/5/6</i>        | 2           |
| CD-ROM    | <i>Protokoly destruktivních a nedestruktivních zkoušek</i> | -           |

**Příloha A – Záznam o svařování desky č. 730/2/2**

| <b>ZÁZNAM O SVAŘOVÁNÍ</b>          | <b>Akreditovaný postup</b> | <b>Registrační č.</b> | <b>Strana</b> |
|------------------------------------|----------------------------|-----------------------|---------------|
| <b>SCHVÁLENÍ POSTUPU SVAŘOVÁNÍ</b> |                            | P92-18-730/2/2        | 1/2           |

|  |   |
|--|---|
| <b>Norma:</b>                                      | -   |
| <b>Doplňkové požadavky mimo rozsah ČSN EN 288:</b> | -   |
| <b>Postup svařování výrobce (pWPS):</b>            | -   |
| <b>Datum svařování:</b> 19.9.2014                  | <b>Místo svařování:</b> Český svářečský ústav s.r.o.  |
| <b>Jméno svářeče:</b> Jiří Gongol                  | <b>Kvalifikace svářeče:</b> EN 287 – 1 141 TBW 6 S t4, 0D48,0 H-L045 ss nb<br>EN 287 – 1 111 TBW 6 B t12, D108,0 H-L045 ss nb |

| <b>ZÁKLADNÍ MATERIÁL(Y) / PARENT MATERIAL(S)</b> |                         |
|--|-------------------------|
| <b>Značka dle standardu:</b>                     | P92 (X10CrWMoVNb9-2)    |
| <b>Další označení:</b>                           | -                       |
| <b>Tloušťka:</b> 18 mm                           | <b>Vnější průměr:</b> - |

| <b>SVAŘOVACÍ MATERIÁLY (SM) / WELDING MATERIALS (WM)</b> |           |                   |         |  |              |
|--|-----------|-------------------|---------|--|--------------|
| Index SM   | Typ       | Označení výrobce  | Výrobce | Norma: Klasifikace                       | Režim sušení |
| A  | Drát      | Thermanit MTS 616 | Böhler  | EN 12070-WZ CrMoWVNb 9 0,5 1,5           |              |
| B  | Plyn      | Argon 4.6         | SIAD    | EC: 231-174-0                            |              |
| C  | Elektroda | Thermanit MTS 616 | Böhler  | EN ISO 3580-A – EZ CroWVNb 9 0,5 2 B42H5 |              |
| D  |           |                   |         |  |              |
| E  |           |                   |         |  |              |

| <b>SVAŘOVACÍ PODMÍNKY / WELDING CONDITIONS</b> |                  |                                     |                       |
|--|------------------|-------------------------------------|-----------------------|
| <b>Typ svarového spoje:</b>                    | Tupý             | <b>Označení zkušebního spoje:</b>   | -                     |
| <b>Způsob přípravy úkosu:</b>                  | Frézováním       | <b>Způsob čištění:</b>              | Kartáčování, broušení |
| <b>Metoda svařování:</b>                       | 141, 111         | <b>Poloha svařování:</b>            | PA                    |
| <b>Wolframová elektroda (Typ/Velikost):</b>    | WT 20 - ø 2,4 mm | <b>Drážkování kořene:</b>           | -                     |
| <b>Ochrana svaru (Index SM):</b>               | B                | <b>Množství:</b>                    | 11 l /min             |
| <b>Ochrana kořene (Index SM):</b>              | -                | <b>Množství:</b>                    | -                     |
| <b>Další informace (je-li požadováno):</b>     |                  |                                     |                       |
| <b>Rozkvy (šířka housenky):</b>                | -                | <b>Vzdálenost kontaktní špičky:</b> | -                     |
| <b>Údaje o pulsním svařování:</b>              | -                | <b>Sklon hořáku:</b>                | -                     |

| <b>TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ / HEAT TREATMENT</b> |  |
|--|--|
| <b>PŘI SVAŘOVÁNÍ / DURING WELDING</b>      | <b>PO SVAŘOVÁNÍ / AFTER WELDING (PWHT)</b> |
| <b>Teplota předehřevu:</b> 250 °C          | <b>Rychlost ohřevu:</b> -                  |
| <b>Interpass teplota:</b> max. 300 °C      | <b>Teplota/Čas výdrže:</b> 730 °C / 2 h    |
| <b>Teplota/Čas dohřevu:</b> 250 °C / 2,5 h | <b>Rychlost ochlazování:</b> -             |
| <b>Další informace:</b> -                  | <b>Další informace:</b> -                  |

|                             |                            |                       |               |
|-----------------------------|----------------------------|-----------------------|---------------|
| <b>ZÁZNAM O SVAŘOVÁNÍ</b>   | <b>Akreditovaný postup</b> | <b>Registrační č.</b> | <b>Strana</b> |
| SCHVÁLENÍ POSTUPU SVAŘOVÁNÍ |                            | P92-18-730/2/2        | 2/2           |

**PODROBNOSTI O PRŮBĚHU SVAŘOVÁNÍ / DETAILS OF WELDING**

| SCHÉMA SPOJE / JOINT DESIGN | POSTUP SVAŘOVÁNÍ / WELDING SEQUENCE |
|-----------------------------|-------------------------------------|
|                             |                                     |

**PARAMETRY SVAŘOVÁNÍ / WELDING PARAMETERS**

| Svarový spoj /housenka | Metoda svařování | Index SM | Průměr (mm) | Proud (A) | Napětí (V) | Typ proudu/polarita | Rychlost svařování (mm·s <sup>-1</sup> ) | Interpass teplota (°C) | Tepelný příkon (kJ·mm <sup>-1</sup> ) |
|------------------------|------------------|----------|-------------|-----------|------------|---------------------|--|------------------------|---------------------------------------|
| 1                      | 141              | A+B      | 2           | 70        | 9,8-10,4   | DC/-                | 1,95                                     | 260                    | 0,22                                  |
| 2                      | 141              | A+B      | 2           | 70        | 9,8-10,6   | DC/-                | 1,29                                     | 220                    | 0,35                                  |
| 3                      | 141              | A+B      | 2           | 70        | 9,8-10,6   | DC/-                | 1,59                                     | 230                    | 0,28                                  |
| 4                      | 111              | C        | 2,5         | 73-80     | 20,4-23    | DC/+                | 3,21                                     | 250                    | 0,46                                  |
| 5                      | 111              | C        | 2,5         | 73-80     | 20,4-23    | DC/+                | 3,62                                     | 220                    | 0,41                                  |
| 6                      | 111              | C        | 2,5         | 73-80     | 20,4-23    | DC/+                | 3,97                                     | 220                    | 0,37                                  |
| 7                      | 111              | C        | 2,5         | 73-80     | 20,4-23    | DC/+                | 2,87                                     | 225                    | 0,51                                  |
| 8                      | 111              | C        | 3,2         | 103-107   | 22,2-23    | DC/+                | 3,29                                     | 215                    | 0,60                                  |
| 9                      | 111              | C        | 3,2         | 103-107   | 22,2-23    | DC/+                | 3,29                                     | 250                    | 0,60                                  |
| 10                     | 111              | C        | 3,2         | 103-107   | 22,2-23    | DC/+                | 2,58                                     | 235                    | 0,76                                  |
| 11                     | 111              | C        | 3,2         | 103-107   | 22,2-23    | DC/+                | 3,52                                     | 240                    | 0,56                                  |
| 12                     | 111              | C        | 3,2         | 103-107   | 22,2-23    | DC/+                | 2,91                                     | 225                    | 0,68                                  |
| 13                     | 111              | C        | 3,2         | 103-107   | 22,8-23    | DC/+                | 2,66                                     | 230                    | 0,74                                  |
| 1K                     | 141              | A+B      | 2           | 105       | 10,1-11    | DC/-                | 1,18                                     | 250                    | 0,59                                  |
| 14                     | 111              | C        | 3,2         | 109-111   | 22,8-23    | DC/+                | 2,27                                     | 225                    | 0,90                                  |
| 15                     | 111              | C        | 3,2         | 109-111   | 22,8-23    | DC/+                | 2,78                                     | 250                    | 0,73                                  |
| 16                     | 111              | C        | 3,2         | 109-111   | 22,8-23    | DC/+                | 2,27                                     | 230                    | 0,90                                  |
| 17                     | 111              | C        | 3,2         | 109-111   | 22,8-23    | DC/+                | 2,12                                     | 240                    | 0,96                                  |
| 18                     | 111              | C        | 3,2         | 109-111   | 22,8-23    | DC/+                | 2,38                                     | 220                    | 0,86                                  |
| 19                     | 111              | C        | 3,2         | 109-111   | 22,8-23    | DC/+                | 2,27                                     | 230                    | 0,90                                  |
| 20                     | 111              | C        | 3,2         | 109-111   | 22,8-23    | DC/+                | 2,54                                     | 225                    | 0,80                                  |
| 21                     | 111              | C        | 3,2         | 109-111   | 22,8-23    | DC/+                | 2,05                                     | 240                    | 1,00                                  |
| 22                     | 111              | C        | 3,2         | 109-111   | 22,8-23    | DC/+                | 2,65                                     | 250                    | 0,77                                  |
| 23                     | 111              | C        | 3,2         | 109-111   | 22,8-23    | DC/+                | 2,60                                     | 220                    | 0,79                                  |
| 24                     | 111              | C        | 3,2         | 109-111   | 22,8-23    | DC/+                | 2,63                                     | 230                    | 0,78                                  |
| 25                     | 111              | C        | 3,2         | 109-111   | 22,8-23    | DC/+                | 2,55                                     | 240                    | 0,80                                  |
| 26                     | 111              | C        | 3,2         | 109-111   | 22,8-23    | DC/+                | 1,85                                     |                        | 1,10                                  |

Další informace:

Zdroj: 141: Fronius Magic Wave 3000 Comfort G/F

111: Fronius Trans Pocket 4000 CEL

**Příloha B – Záznam o svařování desky č. 760/3/3**

| <b>ZÁZNAM O SVAŘOVÁNÍ</b>          | <b>Akreditovaný postup</b> | <b>Registrační č.</b> | <b>Strana</b> |
|------------------------------------|----------------------------|-----------------------|---------------|
| <b>SCHVÁLENÍ POSTUPU SVAŘOVÁNÍ</b> |                            | P92-18-730/3/3        | 1/2           |

|  |   |
|--|---|
| <b>Norma:</b>                                      | -   |
| <b>Doplňkové požadavky mimo rozsah ČSN EN 288:</b> | -   |
| <b>Postup svařování výrobce (pWPS):</b>            | -   |
| <b>Datum svařování:</b> 19.9.2014                  | <b>Místo svařování:</b> Český svářečský ústav s.r.o.  |
| <b>Jméno svářeče:</b> Jiří Gongol                  | <b>Kvalifikace svářeče:</b> EN 287 – 1 141 TBW 6 S t4, 0D48,0 H-L045 ss nb<br>EN 287 – 1 111 TBW 6 B t12, D108,0 H-L045 ss nb |

| <b>ZÁKLADNÍ MATERIÁL(Y) / PARENT MATERIAL(S)</b> |                         |
|--|-------------------------|
| <b>Značka dle standardu:</b>                     | P92 (X10CrWMoVNb9-2)    |
| <b>Další označení:</b>                           | -                       |
| <b>Tloušťka:</b> 18 mm                           | <b>Vnější průměr:</b> - |

| <b>SWAŘOVACÍ MATERIÁLY (SM) / WELDING MATERIALS (WM)</b> |           |                   |         |  |              |
|--|-----------|-------------------|---------|--|--------------|
| Index SM   | Typ       | Označení výrobce  | Výrobce | Norma: Klasifikace                       | Režim sušení |
| A  | Drát      | Thermanit MTS 616 | Böhler  | EN 12070-WZ CrMoWVNb 9 0,5 1,5           |              |
| B  | Plyn      | Argon 4.6         | SIAD    | EC: 231-174-0                            |              |
| C  | Elektroda | Thermanit MTS 616 | Böhler  | EN ISO 3580-A – EZ CroWVNb 9 0,5 2 B42H5 |              |
| D  |           |                   |         |  |              |
| E  |           |                   |         |  |              |

| <b>SWAŘOVACÍ PODMÍNKY / WELDING CONDITIONS</b> |                  |                                     |                       |
|--|------------------|-------------------------------------|-----------------------|
| <b>Typ svarového spoje:</b>                    | Tupý             | <b>Označení zkušebního spoje:</b>   | -                     |
| <b>Způsob přípravy úkosu:</b>                  | Frézováním       | <b>Způsob čištění:</b>              | Kartáčování, broušení |
| <b>Metoda svařování:</b>                       | 141, 111         | <b>Poloha svařování:</b>            | PA                    |
| <b>Wolframová elektroda (Typ/Velikost):</b>    | WT 20 - ø 2,4 mm | <b>Drážkování kořene:</b>           | -                     |
| <b>Ochrana svaru (Index SM):</b>               | B                | <b>Množství:</b>                    | 11 l /min             |
| <b>Ochrana kořene (Index SM):</b>              | -                | <b>Množství:</b>                    | -                     |
| <b>Další informace (je-li požadováno):</b>     |                  |                                     |                       |
| <b>Rozkvy (šířka housenky):</b>                | -                | <b>Vzdálenost kontaktní špičky:</b> | -                     |
| <b>Údaje o pulsním svařování:</b>              | -                | <b>Sklon hořáku:</b>                | -                     |

| <b>TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ / HEAT TREATMENT</b> |  |
|--|--|
| <b>PŘI SVAŘOVÁNÍ / DURING WELDING</b>      | <b>PO SVAŘOVÁNÍ / AFTER WELDING (PWHT)</b> |
| <b>Teplota předehřevu:</b> 240 °C          | <b>Rychlost ohřevu:</b> -                  |
| <b>Interpass teplota:</b> max. 300 °C      | <b>Teplota/Čas výdrže:</b> 730 °C / 3 h    |
| <b>Teplota/Čas dohřevu:</b> 250 °C / 2,5 h | <b>Rychlost ochlazování:</b> -             |
| <b>Další informace:</b> -                  | <b>Další informace:</b> -                  |



|                             |                     |                |        |
|-----------------------------|---------------------|----------------|--------|
| <b>ZÁZNAM O SVAŘOVÁNÍ</b>   | Akreditovaný postup | Registrační č. | Strana |
| SCHVÁLENÍ POSTUPU SVAŘOVÁNÍ |                     | P92-18-730/3/3 | 2/2    |

**PODROBNOSTI O PRŮBĚHU SVAŘOVÁNÍ / DETAILS OF WELDING**

| SCHÉMA SPOJE / JOINT DESIGN | POSTUP SVAŘOVÁNÍ / WELDING SEQUENCE |
|-----------------------------|-------------------------------------|
|                             |                                     |

**PARAMETRY SVAŘOVÁNÍ / WELDING PARAMETERS**

| Svarový spoj /housenka | Metoda svařování | Index SM | Průměr (mm) | Proud (A) | Napětí (V) | Typ proudu/polarita | Rychlost svařování (mm·s <sup>-1</sup> ) | Interpass teplota (°C) | Tepelný příkon (kJ·mm <sup>-1</sup> ) |
|------------------------|------------------|----------|-------------|-----------|------------|---------------------|--|------------------------|---------------------------------------|
| 1                      | 141              | A+B      | 2           | 70        | 9,8-10,4   | DC/-                | 1,72                                     | 210                    | 0,25                                  |
| 2                      | 141              | A+B      | 2           | 70        | 9,5-10,2   | DC/-                | 1,45                                     | 220                    | 0,30                                  |
| 3                      | 141              | A+B      | 2           | 70        | 9,5-10,2   | DC/-                | 1,22                                     | 230                    | 0,35                                  |
| 4                      | 111              | C        | 2,5         | 73-77     | 21-23      | DC/+                | 2,98                                     | 220                    | 0,48                                  |
| 5                      | 111              | C        | 2,5         | 72-77     | 21-23      | DC/+                | 3,38                                     | 220                    | 0,42                                  |
| 6                      | 111              | C        | 2,5         | 72-77     | 21-23      | DC/+                | 2,06                                     | 215                    | 0,69                                  |
| 7                      | 111              | C        | 3,2         | 103-106   | 21,8-23    | DC/+                | 2,45                                     | 230                    | 0,80                                  |
| 8                      | 111              | C        | 3,2         | 103-108   | 20,8-23    | DC/+                | 2,81                                     | 230                    | 0,71                                  |
| 9                      | 111              | C        | 3,2         | 103-110   | 20,8-23    | DC/+                | 1,89                                     | 240                    | 1,07                                  |
| 10                     | 111              | C        | 3,2         | 103-110   | 20,8-23    | DC/+                | 2,55                                     | 230                    | 0,79                                  |
| 11                     | 111              | C        | 3,2         | 103-110   | 22,2-23    | DC/+                | 2,38                                     | 225                    | 0,85                                  |
| 12                     | 111              | C        | 3,2         | 103-108   | 21,3-23    | DC/+                | 2,04                                     | 230                    | 0,97                                  |
| 13                     | 111              | C        | 3,2         | 103-110   | 22,8-23    | DC/+                | 2,19                                     | 225                    | 0,92                                  |
| 14                     | 111              | C        | 3,2         | 103-110   | 22,8-23    | DC/+                | 2,45                                     | 220                    | 0,83                                  |
| 15                     | 111              | C        | 3,2         | 103-110   | 21,8-23    | DC/+                | 1,87                                     | 230                    | 1,08                                  |
| 1K                     | 141              | A+B      | 2           | 105       | 9,4-10,2   | DC/-                | 1,04                                     | 230                    | 0,62                                  |
| 16                     | 111              | C        | 3,2         | 103-110   | 21,6-23    | DC/+                | 2,74                                     | 240                    | 0,74                                  |
| 17                     | 111              | C        | 3,2         | 103-110   | 21,6-23    | DC/+                | 2,31                                     | 230                    | 0,88                                  |
| 18                     | 111              | C        | 3,2         | 103-110   | 21,6-23    | DC/+                | 1,86                                     | 230                    | 1,09                                  |
| 19                     | 111              | C        | 3,2         | 103-110   | 21,6-23    | DC/+                | 2,76                                     | 240                    | 0,73                                  |
| 20                     | 111              | C        | 3,2         | 103-110   | 21,6-23    | DC/+                | 3,30                                     | 242                    | 0,61                                  |
| 21                     | 111              | C        | 3,2         | 103-110   | 21,6-23    | DC/+                | 1,55                                     | 230                    | 1,31                                  |
| 22                     | 111              | C        | 3,2         | 95-104    | 21,6-24    | DC/+                | 3,21                                     | 240                    | 0,62                                  |
| 23                     | 111              | C        | 3,2         | 95-104    | 21,6-24    | DC/+                | 2,49                                     | 225                    | 0,80                                  |
| 24                     | 111              | C        | 3,2         | 95-104    | 21,6-24    | DC/+                | 2,87                                     | 220                    | 0,70                                  |
| 25                     | 111              | C        | 3,2         | 95-104    | 21,6-24    | DC/+                | 1,82                                     |                        | 1,10                                  |

Další informace:

Zdroj: 141: Fronius Magic Wave 3000 Comfort G/F

111: Fronius Trans Pocket 4000 CEL

**Příloha C – Záznam o svařování desky č. 730/6/1**

| <b>ZÁZNAM O SVAŘOVÁNÍ</b>          | <b>Akreditovaný postup</b> | <b>Registrační č.</b> | <b>Strana</b> |
|------------------------------------|----------------------------|-----------------------|---------------|
| <b>SCHVÁLENÍ POSTUPU SVAŘOVÁNÍ</b> |                            | P92-18-730/6/1        | 1/2           |

|  |                             |   |  |
|--|-----------------------------|---|--|
| <b>Norma:</b>                                      | -                           |   |  |
| <b>Doplňkové požadavky mimo rozsah ČSN EN 288:</b> | -                           |   |  |
| <b>Postup svařování výrobce (pWPS):</b>            | -                           |   |  |
| <b>Datum svařování:</b> 18.9.2014                  | <b>Místo svařování:</b>     | Český svářečský ústav s.r.o.  |  |
| <b>Jméno svářeče:</b> Jiří Gongol                  | <b>Kvalifikace svářeče:</b> | EN 287 – 1 141 TBW 6 S t4, 0D48,0 H-L045 ss nb<br>EN 287 – 1 111 TBW 6 B t12, D108,0 H-L045 ss nb |  |

| <b>ZÁKLADNÍ MATERIÁL(Y) / PARENT MATERIAL(S)</b> |                         |
|--|-------------------------|
| <b>Značka dle standardu:</b>                     | P92 (X10CrWMoVNb9-2)    |
| <b>Další označení:</b>                           | -                       |
| <b>Tloušťka:</b> 18 mm                           | <b>Vnější průměr:</b> - |

| <b>SVAŘOVACÍ MATERIÁLY (SM) / WELDING MATERIALS (WM)</b> |            |                         |                |  |                     |
|--|------------|-------------------------|----------------|--|---------------------|
| <b>Index SM</b>  | <b>Typ</b> | <b>Označení výrobce</b> | <b>Výrobce</b> | <b>Norma: Klasifikace</b>                | <b>Režim sušení</b> |
| <b>A</b>   | Drát       | Thermanit MTS 616       | Böhler         | EN 12070-WZ CrMoWVNb 9 0,5 1,5           |                     |
| <b>B</b>   | Plyn       | Argon 4.6               | SIAD           | EC: 231-174-0                            |                     |
| <b>C</b>   | Elektroda  | Thermanit MTS 616       | Böhler         | EN ISO 3580-A – EZ CroWVNb 9 0,5 2 B42H5 |                     |
| <b>D</b>   |            |                         |                |  |                     |
| <b>E</b>   |            |                         |                |  |                     |

| <b>SVAŘOVACÍ PODMÍNKY / WELDING CONDITIONS</b> |                       |
|--|-----------------------|
| <b>Typ svarového spoje:</b>                    | Tupý                  |
| <b>Způsob přípravy úkosu:</b>                  | Frézováním            |
| <b>Metoda svařování:</b>                       | 141, 111              |
| <b>Wolframová elektroda (Typ/Velikost):</b>    | WT 20 - ø 2,4 mm      |
| <b>Ochrana svaru (Index SM):</b>               | B                     |
| <b>Ochrana kořene (Index SM):</b>              | -                     |
| <b>Další informace (je-li požadováno):</b>     |                       |
| <b>Rozkvy (šířka housenky):</b>                | -                     |
| <b>Údaje o pulsním svařování:</b>              | -                     |
| <b>Označení zkušebního spoje:</b>              | -                     |
| <b>Způsob čištění:</b>                         | Kartáčování, broušení |
| <b>Poloha svařování:</b>                       | PA                    |
| <b>Drážkování kořene:</b>                      | -                     |
| <b>Množství:</b>                               | 11 l /min             |
| <b>Množství:</b>                               | -                     |
| <b>Vzdálenost kontaktní špičky:</b>            | -                     |
| <b>Sklon hořáku:</b>                           | -                     |

| <b>TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ / HEAT TREATMENT</b> |                |
|--|----------------|
| <b>PŘI SVAŘOVÁNÍ / DURING WELDING</b>      |                |
| <b>Teplota přehřevu:</b>                   | 240 °C         |
| <b>Interpass teplota:</b>                  | max. 300 °C    |
| <b>Teplota/Čas dohřevu:</b>                | 250 °C / 2,5 h |
| <b>Další informace:</b>                    | -              |
| <b>PO SVAŘOVÁNÍ / AFTER WELDING (PWHT)</b> |                |
| <b>Rychlost ohřevu:</b>                    | -              |
| <b>Teplota/Čas výdrže:</b>                 | 730 °C / 6 h   |
| <b>Rychlost ochlazení:</b>                 | -              |
| <b>Další informace:</b>                    | -              |

|                             |                            |                       |               |
|-----------------------------|----------------------------|-----------------------|---------------|
| <b>ZÁZNAM O SVAŘOVÁNÍ</b>   | <b>Akreditovaný postup</b> | <b>Registrační č.</b> | <b>Strana</b> |
| SCHVÁLENÍ POSTUPU SVAŘOVÁNÍ |                            | P92-18-730/6/1        | 2/2           |

**PODROBNOSTI O PRŮBĚHU SVAŘOVÁNÍ / DETAILS OF WELDING**

| SCHÉMA SPOJE / JOINT DESIGN | POSTUP SVAŘOVÁNÍ / WELDING SEQUENCE |
|-----------------------------|-------------------------------------|
|                             |                                     |

**PARAMETRY SVAŘOVÁNÍ / WELDING PARAMETERS**

| Svarový spoj /housenka | Metoda svařování | Index SM | Průměr (mm) | Proud (A) | Napětí (V) | Typ proudu/polarita | Rychlost svařování (mm·s <sup>-1</sup> ) | Interpass teplota (°C) | Tepelný příkon (kJ·mm <sup>-1</sup> ) |
|------------------------|------------------|----------|-------------|-----------|------------|---------------------|--|------------------------|---------------------------------------|
| 1                      | 141              | A+B      | 2           | 70        | 9,8-10,4   | DC/-                | 1,49                                     | 235                    | 0,30                                  |
| 2                      | 141              | A+B      | 2           | 85        | 10-10,8    | DC/-                | 1,32                                     | 250                    | 0,42                                  |
| 3                      | 141              | A+B      | 2           | 85        | 10,5-11    | DC/-                | 1,13                                     | 225                    | 0,50                                  |
| 4                      | 141              | A+B      | 2           | 85        | 10,5-11    | DC/-                | 1,23                                     | 270                    | 0,46                                  |
| 5                      | 111              | C        | 2,5         | 73-76     | 21,2-22    | DC/+                | 1,45                                     | 260                    | 0,92                                  |
| 6                      | 111              | C        | 2,5         | 73-76     | 21,2-22    | DC/+                | 1,61                                     | 230                    | 0,83                                  |
| 7                      | 111              | C        | 2,5         | 73-76     | 21,2-22    | DC/+                | 1,56                                     | 260                    | 0,86                                  |
| 8                      | 111              | C        | 2,5         | 73-76     | 21,2-22    | DC/+                | 1,52                                     | 235                    | 0,88                                  |
| 9                      | 111              | C        | 3,2         | 109-111   | 22,8-23    | DC/+                | 2,60                                     | 225                    | 0,79                                  |
| 10                     | 111              | C        | 3,2         | 109-111   | 22,8-23    | DC/+                | 2,50                                     | 240                    | 0,82                                  |
| 11                     | 111              | C        | 3,2         | 109-111   | 22,8-23    | DC/+                | 2,66                                     | 255                    | 0,77                                  |
| 12                     | 111              | C        | 3,2         | 109-111   | 22,8-23    | DC/+                | 2,75                                     | 230                    | 0,74                                  |
| 1K                     | 141              | A+B      | 2           | 105-114   | 10,1-11    | DC/-                | 0,98                                     | 240                    | 0,77                                  |
| 13                     | 111              | C        | 3,2         | 109-111   | 22,8-23    | DC/+                | 2,78                                     | 230                    | 0,73                                  |
| 14                     | 111              | C        | 3,2         | 109-111   | 22,8-23    | DC/+                | 2,27                                     | 235                    | 0,90                                  |
| 15                     | 111              | C        | 3,2         | 109-111   | 22,8-23    | DC/+                | 2,78                                     | 220                    | 0,73                                  |
| 16                     | 111              | C        | 3,2         | 109-111   | 22,8-23    | DC/+                | 2,27                                     | 230                    | 0,90                                  |
| 17                     | 111              | C        | 3,2         | 109-111   | 22,8-23    | DC/+                | 2,12                                     | 240                    | 1,09                                  |
| 18                     | 111              | C        | 3,2         | 109-111   | 22,8-23    | DC/+                | 2,38                                     | 230                    | 0,86                                  |
| 19                     | 111              | C        | 3,2         | 109-111   | 22,8-23    | DC/+                | 2,27                                     | 240                    | 0,90                                  |
| 20                     | 111              | C        | 3,2         | 109-111   | 22,8-23    | DC/+                | 2,58                                     | 225                    | 0,79                                  |
| 21                     | 111              | C        | 3,2         | 109-111   | 22,8-23    | DC/+                | 2,00                                     | 235                    | 1,02                                  |
| 22                     | 111              | C        | 3,2         | 109-111   | 22,8-23    | DC/+                | 2,63                                     | 220                    | 0,78                                  |
| 23                     | 111              | C        | 3,2         | 109-111   | 22,8-23    | DC/+                | 2,60                                     | 230                    | 0,79                                  |
| 24                     | 111              | C        | 3,2         | 109-111   | 22,8-23    | DC/+                | 2,66                                     | 225                    | 0,77                                  |
| 25                     | 111              | C        | 3,2         | 109-111   | 22,8-23    | DC/+                | 1,91                                     | 240                    | 1,07                                  |

Další informace:

Zdroj: 141: Fronius Magic Wave 3000 Comfort G/F

111: Fronius Trans Pocket 4000 CEL

**Příloha D – Záznam o svařování desky č. 760/4/4**

| <b>ZÁZNAM O SVAŘOVÁNÍ</b>          | <b>Akreditovaný postup</b> | <b>Registrační č.</b> | <b>Strana</b> |
|------------------------------------|----------------------------|-----------------------|---------------|
| <b>SCHVÁLENÍ POSTUPU SVAŘOVÁNÍ</b> |                            | P92-18-760/4/4        | 1/2           |

|  |                             |   |  |
|--|-----------------------------|---|--|
| <b>Norma:</b>                                      | -                           |   |  |
| <b>Doplňkové požadavky mimo rozsah ČSN EN 288:</b> | -                           |   |  |
| <b>Postup svařování výrobce (pWPS):</b>            | -                           |   |  |
| <b>Datum svařování:</b> 22.9.2014                  | <b>Místo svařování:</b>     | Český svářečský ústav s.r.o.  |  |
| <b>Jméno svářeče:</b> Jiří Gongol                  | <b>Kvalifikace svářeče:</b> | EN 287 – 1 141 TBW 6 S t4, 0D48,0 H-L045 ss nb<br>EN 287 – 1 111 TBW 6 B t12, D108,0 H-L045 ss nb |  |

| <b>ZÁKLADNÍ MATERIÁL(Y) / PARENT MATERIAL(S)</b> |                         |
|--|-------------------------|
| <b>Značka dle standardu:</b>                     | P92 (X10CrWMoVNb9-2)    |
| <b>Další označení:</b>                           | -                       |
| <b>Tloušťka:</b> 18 mm                           | <b>Vnější průměr:</b> - |

| <b>SVAŘOVACÍ MATERIÁLY (SM) / WELDING MATERIALS (WM)</b> |            |                         |                |  |                     |
|--|------------|-------------------------|----------------|--|---------------------|
| <b>Index SM</b>  | <b>Typ</b> | <b>Označení výrobce</b> | <b>Výrobce</b> | <b>Norma: Klasifikace</b>                | <b>Režim sušení</b> |
| <b>A</b>   | Drát       | Thermanit MTS 616       | Böhler         | EN 12070-WZ CrMoWVNb 9 0,5 1,5           |                     |
| <b>B</b>   | Plyn       | Argon 4.6               | SIAD           | EC: 231-174-0                            |                     |
| <b>C</b>   | Elektroda  | Thermanit MTS 616       | Böhler         | EN ISO 3580-A – EZ CroWVNb 9 0,5 2 B42H5 |                     |
| <b>D</b>   |            |                         |                |  |                     |
| <b>E</b>   |            |                         |                |  |                     |

| <b>SVAŘOVACÍ PODMÍNKY / WELDING CONDITIONS</b> |                       |
|--|-----------------------|
| <b>Typ svarového spoje:</b>                    | Tupý                  |
| <b>Způsob přípravy úkosu:</b>                  | Frézováním            |
| <b>Metoda svařování:</b>                       | 141, 111              |
| <b>Wolframová elektroda (Typ/Velikost):</b>    | WT 20 - ø 2,4 mm      |
| <b>Ochrana svaru (Index SM):</b>               | B                     |
| <b>Ochrana kořene (Index SM):</b>              | -                     |
| <b>Další informace (je-li požadováno):</b>     |                       |
| <b>Rozkvy (šířka housenky):</b>                | -                     |
| <b>Údaje o pulsním svařování:</b>              | -                     |
| <b>Označení zkušebního spoje:</b>              | -                     |
| <b>Způsob čištění:</b>                         | Kartáčování, broušení |
| <b>Poloha svařování:</b>                       | PA                    |
| <b>Drážkování kořene:</b>                      | -                     |
| <b>Množství:</b>                               | 11 l/min              |
| <b>Množství:</b>                               | -                     |
| <b>Vzdálenost kontaktní špičky:</b>            | -                     |
| <b>Sklon hořáku:</b>                           | -                     |

| <b>TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ / HEAT TREATMENT</b> |                |
|--|----------------|
| <b>PŘI SVAŘOVÁNÍ / DURING WELDING</b>      |                |
| <b>Teplota přehřevu:</b>                   | 240 °C         |
| <b>Interpass teplota:</b>                  | max. 300 °C    |
| <b>Teplota/Čas dohřevu:</b>                | 250 °C / 2,5 h |
| <b>Další informace:</b>                    | -              |
| <b>PO SVAŘOVÁNÍ / AFTER WELDING (PWHT)</b> |                |
| <b>Rychlost ohřevu:</b>                    | -              |
| <b>Teplota/Čas výdrže:</b>                 | 760 °C / 4 h   |
| <b>Rychlost ochlazení:</b>                 | -              |
| <b>Další informace:</b>                    | -              |

|                             |                     |                |        |
|-----------------------------|---------------------|----------------|--------|
| <b>ZÁZNAM O SVAŘOVÁNÍ</b>   | Akreditovaný postup | Registrační č. | Strana |
| SCHVÁLENÍ POSTUPU SVAŘOVÁNÍ |                     | P92-18-760/4/4 | 2/2    |

**PODROBNOSTI O PRŮBĚHU SVAŘOVÁNÍ / DETAILS OF WELDING**

| SCHÉMA SPOJE / JOINT DESIGN | POSTUP SVAŘOVÁNÍ / WELDING SEQUENCE |
|-----------------------------|-------------------------------------|
|                             |                                     |

**PARAMETRY SVAŘOVÁNÍ / WELDING PARAMETERS**

| Svarový spoj /housenka | Metoda svařování | Index SM | Průměr (mm) | Proud (A) | Napětí (V) | Typ proudu/polarita | Rychlost svařování (mm·s <sup>-1</sup> ) | Interpass teplota (°C) | Tepelný příkon (kJ·mm <sup>-1</sup> ) |
|------------------------|------------------|----------|-------------|-----------|------------|---------------------|--|------------------------|---------------------------------------|
| 1                      | 141              | A+B      | 2           | 70        | 9,8-10,4   | DC/-                | 1,91                                     | 235                    | 0,23                                  |
| 2                      | 141              | A+B      | 2           | 70        | 9,5-10,2   | DC/-                | 1,53                                     | 220                    | 0,28                                  |
| 3                      | 141              | A+B      | 2           | 70        | 9,5-10,2   | DC/-                | 1,51                                     | 210                    | 0,28                                  |
| 4                      | 111              | C        | 2,5         | 72-79     | 21-23      | DC/+                | 2,84                                     | 210                    | 0,51                                  |
| 5                      | 111              | C        | 2,5         | 72-79     | 21-23      | DC/+                | 3,05                                     | 220                    | 0,48                                  |
| 6                      | 111              | C        | 2,5         | 72-79     | 21-23      | DC/+                | 2,11                                     | 230                    | 0,69                                  |
| 7                      | 111              | C        | 3,2         | 108-113   | 20,8-23    | DC/+                | 2,91                                     | 225                    | 0,71                                  |
| 8                      | 111              | C        | 3,2         | 108-113   | 20,8-23    | DC/+                | 3,17                                     | 235                    | 0,66                                  |
| 9                      | 111              | C        | 3,2         | 108-113   | 20,8-23    | DC/+                | 2,29                                     | 225                    | 0,91                                  |
| 10                     | 111              | C        | 3,2         | 108-113   | 20,8-23    | DC/+                | 2,45                                     | 230                    | 0,85                                  |
| 11                     | 111              | C        | 3,2         | 108-113   | 20,8-23    | DC/+                | 2,81                                     | 220                    | 0,74                                  |
| 12                     | 111              | C        | 3,2         | 108-113   | 20,8-23    | DC/+                | 2,21                                     | 235                    | 0,94                                  |
| 1K                     | 141              | A+B      | 2           | 105       | 10-10,7    | DC/-                | 1,06                                     | 240                    | 0,64                                  |
| 13                     | 111              | C        | 3,2         | 108-113   | 20,8-23    | DC/+                | 2,27                                     | 250                    | 0,92                                  |
| 14                     | 111              | C        | 3,2         | 108-113   | 20,8-23    | DC/+                | 2,52                                     | 240                    | 0,83                                  |
| 15                     | 111              | C        | 3,2         | 108-113   | 20,8-23    | DC/+                | 1,68                                     | 240                    | 1,24                                  |
| 16                     | 111              | C        | 3,2         | 108-113   | 21,2-23    | DC/+                | 2,29                                     | 250                    | 0,91                                  |
| 17                     | 111              | C        | 3,2         | 108-113   | 21,2-23    | DC/+                | 2,45                                     | 245                    | 0,85                                  |
| 18                     | 111              | C        | 3,2         | 108-113   | 21,2-23    | DC/+                | 1,49                                     | 230                    | 1,40                                  |
| 19                     | 111              | C        | 3,2         | 108-113   | 21,2-23    | DC/+                | 2,78                                     | 245                    | 0,75                                  |
| 20                     | 111              | C        | 3,2         | 108-113   | 21,2-23    | DC/+                | 2,68                                     | 250                    | 0,78                                  |
| 21                     | 111              | C        | 3,2         | 108-113   | 21,2-23    | DC/+                | 1,59                                     | 235                    | 1,31                                  |
| 22                     | 111              | C        | 3,2         | 95-105    | 21,6-24    | DC/+                | 2,78                                     | 240                    | 0,73                                  |
| 23                     | 111              | C        | 3,2         | 95-105    | 21,6-24    | DC/+                | 2,78                                     | 235                    | 0,73                                  |
| 24                     | 111              | C        | 3,2         | 95-105    | 21,6-24    | DC/+                | 2,66                                     | 240                    | 0,76                                  |
| 25                     | 111              | C        | 3,2         | 95-105    | 21,6-24    | DC/+                | 1,51                                     |                        | 1,34                                  |

Další informace:

Zdroj: 141: Fronius Magic Wave 3000 Comfort G/F

111: Fronius Trans Pocket 4000 CEL

**Příloha E – Záznam o svařování desky č. 760/5/6**

| <b>ZÁZNAM O SVAŘOVÁNÍ</b>          | <b>Akreditovaný postup</b> | <b>Registrační č.</b> | <b>Strana</b> |
|------------------------------------|----------------------------|-----------------------|---------------|
| <b>SCHVÁLENÍ POSTUPU SVAŘOVÁNÍ</b> |                            | P92-18-760/5/6        | 1/2           |

|  |   |
|--|---|
| <b>Norma:</b>                                      | -   |
| <b>Doplňkové požadavky mimo rozsah ČSN EN 288:</b> | -   |
| <b>Postup svařování výrobce (pWPS):</b>            | -   |
| <b>Datum svařování:</b> 22.9.2014                  | <b>Místo svařování:</b> Český svářečský ústav s.r.o.  |
| <b>Jméno svářeče:</b> Jiří Gongol                  | <b>Kvalifikace svářeče:</b> EN 287 – 1 141 TBW 6 S t4, 0D48,0 H-L045 ss nb<br>EN 287 – 1 111 TBW 6 B t12, D108,0 H-L045 ss nb |

| <b>ZÁKLADNÍ MATERIÁL(Y) / PARENT MATERIAL(S)</b> |                         |
|--|-------------------------|
| <b>Značka dle standardu:</b>                     | P92 (X10CrWMoVNb9-2)    |
| <b>Další označení:</b>                           | -                       |
| <b>Tloušťka:</b> 18 mm                           | <b>Vnější průměr:</b> - |

| <b>SVAŘOVACÍ MATERIÁLY (SM) / WELDING MATERIALS (WM)</b> |            |                         |                |  |                     |
|--|------------|-------------------------|----------------|--|---------------------|
| <b>Index SM</b>  | <b>Typ</b> | <b>Označení výrobce</b> | <b>Výrobce</b> | <b>Norma: Klasifikace</b>                | <b>Režim sušení</b> |
| <b>A</b>   | Drát       | Thermanit MTS 616       | Böhler         | EN 12070-WZ CrMoWVNb 9 0,5 1,5           |                     |
| <b>B</b>   | Plyn       | Argon 4.6               | SIAD           | EC: 231-174-0                            |                     |
| <b>C</b>   | Elektroda  | Thermanit MTS 616       | Böhler         | EN ISO 3580-A – EZ CroWVNb 9 0,5 2 B42H5 |                     |
| <b>D</b>   |            |                         |                |  |                     |
| <b>E</b>   |            |                         |                |  |                     |

| <b>SVAŘOVACÍ PODMÍNKY / WELDING CONDITIONS</b> |                       |
|--|-----------------------|
| <b>Typ svarového spoje:</b>                    | Tupý                  |
| <b>Způsob přípravy úkosu:</b>                  | Frézováním            |
| <b>Metoda svařování:</b>                       | 141, 111              |
| <b>Wolframová elektroda (Typ/Velikost):</b>    | WT 20 - ø 2,4 mm      |
| <b>Ochrana svaru (Index SM):</b>               | B                     |
| <b>Ochrana kořene (Index SM):</b>              | -                     |
| <b>Další informace (je-li požadováno):</b>     |                       |
| <b>Rozkvy (šířka housenky):</b>                | -                     |
| <b>Údaje o pulsním svařování:</b>              | -                     |
| <b>Označení zkušebního spoje:</b>              | -                     |
| <b>Způsob čištění:</b>                         | Kartáčování, broušení |
| <b>Poloha svařování:</b>                       | PA                    |
| <b>Drážkování kořene:</b>                      | -                     |
| <b>Množství:</b>                               | 11 l/min              |
| <b>Množství:</b>                               | -                     |
| <b>Vzdálenost kontaktní špičky:</b>            | -                     |
| <b>Sklon hořáku:</b>                           | -                     |

| <b>TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ / HEAT TREATMENT</b> |  |
|--|--|
| <b>PŘI SVAŘOVÁNÍ / DURING WELDING</b>      | <b>PO SVAŘOVÁNÍ / AFTER WELDING (PWHT)</b> |
| <b>Teplota přehřevu:</b> 245 °C            | <b>Rychlost ohřevu:</b> -                  |
| <b>Interpass teplota:</b> max. 300 °C      | <b>Teplota/Čas výdrž:</b> 760 °C / 6 h     |
| <b>Teplota/Čas dohřevu:</b> 250 °C / 2,5 h | <b>Rychlost ochlazení:</b> -               |
| <b>Další informace:</b> -                  | <b>Další informace:</b> -                  |

|                             |                            |                       |               |
|-----------------------------|----------------------------|-----------------------|---------------|
| <b>ZÁZNAM O SVAŘOVÁNÍ</b>   | <b>Akreditovaný postup</b> | <b>Registrační č.</b> | <b>Strana</b> |
| SCHVÁLENÍ POSTUPU SVAŘOVÁNÍ |                            | P92-18-760/5/6        | 2/2           |

**PODROBNOSTI O PRŮBĚHU SVAŘOVÁNÍ / DETAILS OF WELDING**

| SCHÉMA SPOJE / JOINT DESIGN | POSTUP SVAŘOVÁNÍ / WELDING SEQUENCE |
|-----------------------------|-------------------------------------|
|                             |                                     |

**PARAMETRY SVAŘOVÁNÍ / WELDING PARAMETERS**

| Svarový spoj /housenka | Metoda svařování | Index SM | Průměr (mm) | Proud (A) | Napětí (V) | Typ proudu/polarita | Rychlost svařování (mm·s <sup>-1</sup> ) | Interpass teplota (°C) | Tepelný příkon (kJ·mm <sup>-1</sup> ) |
|------------------------|------------------|----------|-------------|-----------|------------|---------------------|--|------------------------|---------------------------------------|
| 1                      | 141              | A+B      | 2           | 70        | 10-10,8    | DC/-                | 1,80                                     | 245                    | 0,25                                  |
| 2                      | 141              | A+B      | 2           | 70        | 10-10,8    | DC/-                | 1,51                                     | 255                    | 0,30                                  |
| 3                      | 141              | A+B      | 2           | 70        | 10-10,8    | DC/-                | 1,41                                     | 245                    | 0,32                                  |
| 4                      | 111              | C        | 2,5         | 72-77     | 21-23,4    | DC/+                | 2,63                                     | 235                    | 0,55                                  |
| 5                      | 111              | C        | 2,5         | 72-77     | 21-23,4    | DC/+                | 3,05                                     | 245                    | 0,47                                  |
| 6                      | 111              | C        | 2,5         | 72-77     | 21-23,4    | DC/+                | 2,06                                     | 235                    | 0,70                                  |
| 7                      | 111              | C        | 3,2         | 105-113   | 21-23,4    | DC/+                | 2,91                                     | 250                    | 0,73                                  |
| 8                      | 111              | C        | 3,2         | 105-113   | 21-23,4    | DC/+                | 3,09                                     | 240                    | 0,69                                  |
| 9                      | 111              | C        | 3,2         | 105-113   | 21-23,4    | DC/+                | 2,35                                     | 250                    | 0,90                                  |
| 10                     | 111              | C        | 3,2         | 105-113   | 21-23,4    | DC/+                | 2,84                                     | 245                    | 0,75                                  |
| 11                     | 111              | C        | 3,2         | 105-113   | 21-23,4    | DC/+                | 2,63                                     | 250                    | 0,80                                  |
| 12                     | 111              | C        | 3,2         | 105-113   | 21-23,4    | DC/+                | 2,31                                     | 240                    | 0,92                                  |
| 1K                     | 141              | A+B      | 2           | 105       | 10-10,6    | DC/-                | 1,00                                     | 250                    | 0,67                                  |
| 13                     | 111              | C        | 3,2         | 105-113   | 21-23,4    | DC/+                | 2,40                                     | 240                    | 0,88                                  |
| 14                     | 111              | C        | 3,2         | 105-113   | 21-23,4    | DC/+                | 2,42                                     | 235                    | 0,87                                  |
| 15                     | 111              | C        | 3,2         | 105-113   | 21-23,4    | DC/+                | 1,87                                     | 240                    | 1,13                                  |
| 16                     | 111              | C        | 3,2         | 105-113   | 21-23,4    | DC/+                | 2,21                                     | 250                    | 0,96                                  |
| 17                     | 111              | C        | 3,2         | 105-113   | 21-23,4    | DC/+                | 2,31                                     | 250                    | 0,92                                  |
| 18                     | 111              | C        | 3,2         | 105-113   | 21-23,4    | DC/+                | 1,64                                     | 240                    | 1,29                                  |
| 19                     | 111              | C        | 3,2         | 105-113   | 21-23,4    | DC/+                | 2,65                                     | 245                    | 0,80                                  |
| 20                     | 111              | C        | 3,2         | 105-113   | 21-23,4    | DC/+                | 2,72                                     | 240                    | 0,78                                  |
| 21                     | 111              | C        | 3,2         | 105-113   | 21-23,4    | DC/+                | 1,64                                     | 245                    | 1,29                                  |
| 22                     | 111              | C        | 3,2         | 95-105    | 21,4-24    | DC/+                | 2,65                                     | 240                    | 0,76                                  |
| 23                     | 111              | C        | 3,2         | 95-105    | 21,4-24    | DC/+                | 2,74                                     | 245                    | 0,74                                  |
| 24                     | 111              | C        | 3,2         | 95-105    | 21,4-24    | DC/+                | 2,72                                     | 250                    | 0,74                                  |
| 25                     | 111              | C        | 3,2         | 95-105    | 21,4-24    | DC/+                | 1,63                                     |                        | 1,24                                  |

Další informace:

Zdroj: 141: Fronius Magic Wave 3000 Comfort G/F

111: Fronius Trans Pocket 4000 CEL